



FENOMENOLOGIA ESTRUTURAL DA DUPLA CURVATURA NO PROCESSO DE IDEAÇÃO ARQUITETÓNICA

Um paradigma operativo para a gestão da Morfogénese Estrutural

Doutoramento em Arquitetura

Especialidade - Teoria e Prática do Projeto

Doutorando: Mestre **Alexandrino Diogo**

Orientadores: Prof.º Dr.º **António José Morais**

Prof.º Dr.º **Pedro Januário**

Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor

2019



FENOMENOLOGIA ESTRUTURAL DA DUPLA CURVATURA NO PROCESSO DE IDEAÇÃO ARQUITETÓNICA

Um paradigma operativo para a gestão da Morfogénese Estrutural

Ramo de Doutoramento - Arquitetura

Especialidade - Teoria e Prática do Projeto

Doutorando:

Mestre Alexandrino Diogo

Orientadores:

Prof.º Dr.º António José Morais

Prof.º Dr.º Pedro Januário

Presidente:

Doutor Miguel Calado Baptista-Bastos, Professor Auxiliar da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Vogais:

Doutor António José Morais, Faculdade de Arquitetura, Professor Associado com Agregação de Arquitetura da Universidade de Lisboa, orientador;

Doutor Ricardo Zúquete, Professor Associado da Universidade Lusíada de Lisboa;

Doutor Vítor Lopes dos Santos, Professor Associado da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa

Doutor António Álvaro Borges Abel, Professor Auxiliar da Universidade de Évora;

Doutor Nuno Dinis Cortiços, Professor Auxiliar da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa.

Tese especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor

2019

Dedicatória

Este trabalho é dedicado as 3 pessoas que estiveram sempre ao meu lado ao longo de toda a minha vida.

Ao meu pai (in memoriam), que de algum lugar, estará sempre a olhar por mim,
à minha mãe, que nunca mediu esforços para me dar apoio,
e à minha irmã, grande e incansável companheira dos bons e maus momentos.

Agradecimentos

No fim deste longo percurso, em grande parte individual e solitário, mas tendo a consciência que sozinho nada disto era possível, resta-me assinalar os meus mais sinceros agradecimentos às individualidades, que de uma forma ou de outra, contribuíram para que esta tese se tornasse numa realidade. Correndo o risco de injustamente, mas de forma involuntária, não referir algum dos contributos, quero expressar a minha mais profunda gratidão a todos os que muitas vezes sem saber estiveram a meu lado, oferecendo ajuda e abrindo novos caminhos e a quem dedico este projeto de vida.

- Ao nível institucional, à minha casa mãe de formação, a Faculdade de Arquitetura de Lisboa, onde desenvolvi todo o meu percurso académico, iniciando o mesmo com a Licenciatura em Arquitetura, passando pelo mestrado em 2014, culminado nesta fase. Grato por mais uma vez, me terem disponibilizado o acesso às instalações e oficinas, etc, de forma a permitir a minha interação e participação nas atividades que necessitei desenvolver ao longo da tese.

- Ao meu orientador, Professor Doutor António José Morais, por quem tenho profunda e leal admiração, a quem devo vários agradecimentos. Em primeiro lugar por todos os ensinamentos que me tem vindo a transmitir ao longo de todos estes anos, de forma generosa e dedicada. A começar pela licenciatura, em que as suas aulas marcaram de um modo indelével, a minha forma de pensar e fazer arquitetura. Em segundo, por me ter incitado a desenvolver esta tese, acreditando de imediato no trabalho que eu poderia desenvolver, tendo a sua orientação sido fundamental para o seu desenvolvimento. Este apoio foi sempre pragmático, sábio, generoso e paciente, relativamente às dúvidas que a pesquisa me ia colocando e aos problemas que tive de enfrentar e ultrapassar. Mas também pela exigência desafiadora, aos mais diversos níveis, com que me orientou, permitindo-me, testar, procurar e ir mais além, no sentido da busca da clareza e do rigor científico. Por último, quero expressar-lhe o meu mais sincero agradecimento por todas as oportunidades de aprendizagem e de trabalho que me tem proporcionado, que em muito enriqueceram este trabalho e a minha visão pessoal e sem as quais não tinha conseguido terminar este caminho. Obrigado por nunca ter desistido de mim e ter-me proporcionado todos os serões de ensinamentos e discussões de ideias durante a concretização deste objetivo.

- Ao meu orientador Professor Doutor Pedro Januário (FAUTL), pela sua atitude sempre positiva e motivadora, permanente disponibilidade e incentivo, por tudo o que me ensinou de um modo devotado e incansável para elaboração deste estudo. A isto acresce uma admiração intelectual e o seu exemplo enquanto professor.

- Durante o meu percurso académico, jamais poderia não expressar a minha admiração pelos professores que foram determinantes tanto no meu percurso académico, como pessoal e mesmo profissional e aos quais me ligam laços de respeito, admiração e amizade, dos quais destaco: Professor Luís Sanchez Carvalho (FAUL) e Professor António Canau (FAUL).

- Não posso esquecer, o carinho e simpatia de todas as colaboradoras da Biblioteca da FAUL, espaço este, que desde a minha fase de Licenciatura, sempre recorri e onde passei grande parte dos meus tempos, neste longo percurso académico. Um bem-haja ao conforto e apoio que sempre me disponibilizaram em especial a D^a Pilar. À D^a Alda que ao longo deste percurso sempre foi uma companhia amiga, simpática e colaborante, por último não poderia esquecer a D^a Lúcia pelo seu profissionalismo e amizade.

- Para execução do meu protótipo, não posso deixar de destacar a pronta ajuda da Dr.^a Isa, incansável na oferta dos seus conhecimentos de forma a proporcionar a execução dos moldes, a escolha dos materiais até à sua cozedura/ concretização.

- Ao longo do meu percurso de vida e da investigação, tive o privilégio e a felicidade de construir verdadeiras amizades, que me fazem sentir, que não importa o problema e/ou o obstáculo que tenha que enfrentar, pois eles estarão sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus amigos com quem posso partilhar conhecimentos, experiências e uma vivência humana única, pois nesta fase, compreenderam a minha ausência, acompanharam a minha dedicação, apoiaram-me incondicionalmente e por quem tenho grande admiração, por fazerem parte da minha história de vida.

Entre eles destaco os Arquitetos, Nuno Teixeira, Ana Cerqueira, Ana Sofia Pires, Paulo Pires, Paulo Azevedo e Ana Tuna.

Por último, agradeço à minha família, grande pilar da minha existência, que me proporcionou a melhor educação possível, tendo lutado com todos os seus esforços, para possibilitar mais esta etapa da minha vida. Sei o quanto se esforçaram, para me assegurar uma formação académica diferenciada, que culminou na realização deste meu objetivo. Sou eternamente grato, pelo amor, carinho e proteção que sempre me dedicaram. À minha mãe, que sem a sua compreensão, ajuda, confiança e amor nada seria possível. Ao meu pai (in memoriam) que infelizmente não pode estar presente

fisicamente, nesta fase final, mas que sei que estará certamente atento e a quem devo muito pelos seus ensinamentos e valores passados, que moldaram o meu carácter e forma de estar na vida. Obrigada por tudo. Eterna saudade!! E à minha irmã, pelo seu indefetível suporte em todas as ocasiões, na partilha incessante de soluções, quando elas pareciam não aparecer. Sem ti, tudo era mais difícil.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar o contrário”.

Albert Einstein

A todos, o meu eterno e reconhecido agradecimento.

Resumo

O elevado valor plástico e a eficiência estrutural intrínseca das formas curvas contrasta paradoxalmente com a sua parca utilização na arquitetura, não tirando proveito das suas potencialidades e tornando-a mais pobre espacialmente.

A maior complexidade destas formas, exige por sua vez um maior domínio da geometria, da fenomenologia estrutural e dos processos construtivos, impondo uma visão holística e interdisciplinar, que resulte num processo dialético entre a conceção e a construção.

As ferramentas digitais deviam constituir um quadro tecnológico capaz de acolher e responder a estas questões, designadamente da produção das superfícies curvas. Esta realidade emergente exige um processo cognitivo e metodológico, que importa refletir, quer na prática profissional, quer no ensino da arquitetura.

As teorias de projeto digital e os seus esquemas taxonómicos, estão longe de refletir as necessidades operativas e teóricas da prática de projeto. Embora intua a sua importância na prática do arquiteto, a sua abordagem é ainda de grande abstração, a um nível semiótico.

O trabalho ora produzido recorre a um conjunto de axiomas e teoremas operativos para constituir uma metodologia de carácter funcional, que tem a criatividade como capacidade operativa máxima.

A tecnologia construtiva que emerge do pós-guerra regida pela necessidade de baixo custo e rapidez, resulta em sistemas construtivos lineares, inábeis em lidar com a conceção e manuseamento da geometria curva e com a personalização.

Esta lacuna foi o pretexto para o desenvolvimento do sistema construtivo Brick-Warp.

O sistema referido recorre a peças produzidas em série, personalizadas à posteriori por processos de fabricação digital, juntando a produção em série com a personalização em série. A isto acresce um processo de montagem que recorre ao pré-esforço para estabilizar as peças, dispensando a utilização de cibramento. O que torna o sistema construtivo, pensamos, especialmente competitivo.

O trabalho desenvolvido consegue abarcar na sua aproximação ao problema, tanto a a dimensão teórica como a dimensão construtiva, originalidade essa que, pensamos, fortalece a proficiência das proposições apresentadas.

Palavras-Chave: Superfícies curvas e dupla curvatura, Fenomenologia estrutural, Sistemas construtivos, Ferramentas digitais, Alvenaria estrutural.

Abstract

The inherent structural efficiency of curved shapes and the eminent value of their plasticity contrasts paradoxically with its sparse use in Architecture. This situation prevents the whole subject matter of profiting from this area of great potential, thus rendering it less rich in terms of spacial analysis and use.

The greater complexity of these shapes demands in turn a greater mastery of Geometry, structural phenomenology and correlative building processes, imposes a holistic and therefore interdisciplinary approach which results both in and from a dialectal process between conception and construction.

The digital tools should make up a technological framework capable of responding to these questions, namely of the creation of curved shapes. The reality demands a cognitive methodology which reflect this, whether in architectural practice or teaching.

Theories for digital processing and their taxonomic schemes are far from reflecting the operational and theoretical demands regarding of project practice. Although it is important in the architect's practice, his approach is still of great abstraction.

The present dissertation resorts to a set of principles and theorems to build a functional methodology which holds creativity as its top operating capability.

Constructive technology emerging from the post war era, governed by the need for low cost and speed derived into linear constructive systems, inapt to dealing with the design and handling curved geometry or customizing and personalization.

This gap was the pretext for the development of the Brick-Warp system.

The given system resorted to parts which were mass produced and later personalised by digital fabrication, marrying mass production to mass personalisation. An assembly procedure is then used resorting to pre-stress in order to stabilize the parts thus dismissing the need to apply scaffold. It is these features that will ultimately make the system, we think, specially competitive.

The work now completed, encompasses both the theoretical and the constructive dimensions of the problem, the originality of which, we think, strengthens the proficiency of the propositions now presented.

Key words: Curved shapes and double curvature shapes, structural phenomenology, building systems, constructive systems, digital tools, structural masonry.

Lista de siglas, abreviaturas e acrónimos

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

AEC – Indústria da Arquitetura Engenharia e Construção

APPLET– é um pequeno software que executa uma atividade específica, dentro (do contexto) de outro programa maior (como por exemplo um web browser), geralmente como um Plugin. O termo foi introduzido pelo AppleScript em 1993

AVAC – (*Automated Vacuum*) sistemas de climatização do espaço por meio de equipamentos

BIM – (*Building Information Modeling*) Modelação da Informação de Construção

BRG (*Block Research Group*) Grupo de pesquisa liderado pelo arquiteto Philippe Block

CAD – (*Computer Aided Design*) Desenho Assistido por Computador

CAE – (*Computer Aided Engineering*) Engenharia Assistida por Computador

CAM – (*Computer Aided Manufacturing*) Manufatura Assistida por Computador

CATIA – (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*)

CFD – Análise Computacional de Fluidos

CNC – (Computerized Numerical Control) Controlo Numérico Computorizado

DAD – Digital Architectural Design

DEM - (*Discrete element modelling*)

EPS – (Expanded Poly Styrene) - poliestireno expandido é um plástico celular rígido, constituída por um aglomerado de grânulos em espuma moldada

ETH – (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) Instituto Federal de Tecnologia de Zurique

FDM – (*Fused Deposition Modeling*)

FE – (Finite element) Elementos finitos

FEM – (*Finite element method*) Método de Elementos Finitos

FIRMWARE – é o conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no hardware de um equipamento eletrónico

GFRC – Glass fiber reinforced concrete

GFRP – Glass fiber reinforced plastics

HDF – High Density Fiberboard

IASS – (*International Association for Shell and Spatial Structures*)

ICD – (*Institute for Computational Design and Construction*) Instituto de Design e Construção Computacional da Universidade de Estugarda

IL – (*Institut für leichte Flächentragwerke*) Instituto de Estruturas Ligeiras

IST – Instituto Superior Técnico

MADA – Monash University Art Design & Architecture

MIT – (*Massachusetts Institute of Technology*) Instituto de Tecnologia Massachusetts.

NC – (*Numeric Control*) - Controlo Numérico

NSW Chapter - (*Australian Institute of Architects*) Instituto Australiano de arquitetura.

NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) superfícies que são geralmente visualizadas usando as suas curvas de valor de parâmetro

NZEB - (*neary zero energy building*) Eedifícios de balanço energético quase zero.

ONU – Organização das Nações Unidas

PLUG-IN – Programa de computador usado para adicionar funções a outros programas, provendo alguma funcionalidade especial ou muito específica. Geralmente pequeno e leve

STL – (*Stereolithography Apparatus*) Estereolitografia.

SUDU – (*Sustainable Urban Dwelling Unit*) projeto realizado na Etiópia entre 2010 -2011

TNA – (*Thrust Network Analysis*) ferramenta computacional desenvolvida no MIT para explorar estruturas de equilíbrio tridimensional

UMINHO – Universidade do Minho

UNAM - (*Universidad Nacional Autónoma de México*) Universidade Nacional

UPC – Universidade Politécnica da Catalunha

UTS - (University of Technology Sydney) Universidade de Tecnologia de Sidney

Índice geral

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Âmbito da tese	1
1.2 A gravítica da forma	9
1.3. Contextualização do problema	19
1.3.1 Problema geral	19
1.3.2 Problemas específicos	23
1.4 Objetivos	26
1.4.1 Objetivos gerais	26
1.4.1 Objetivos específicos	26
1.5 Hipóteses	28
1.5.1 Hipóteses gerais	28
1.5.2 Hipóteses específicas	29
1.6. Pertinência da investigação	30
1.7. Motivação pessoal e trabalho desenvolvido	32
1.8 Metodologia - desenho da tese	32
1.9 Contributos da tese-proposta	36
1.10 Organização da tese	38

Capítulo 2 - Metodologia de investigação

2.1 Introdução	42
2.2 Questão epistemológica	42
2.3 Metodologias quantitativas e qualitativas	43
2.4 Metodologias hipotético-dedutivas	48
2.5 Investigação-ação i.e., <i>action-research</i> , ou, <i>Pesquisa-ação</i>	50
2.5.1 O ciclo da investigação-ação	51
2.5.2 As características da Investigação-ação	53
2.5.3 O relatório da pesquisa-ação	56
2.5.4 Conclusão	58

Capítulo 3 – Fenomenologia estrutural

3.1 Funcionamento estrutural na arquitetura	60
3.2 Força – forma – eficiência	83
3.2.1. Geometria - disciplina operativa da forma	88
3.3. A estrutura na arquitetura	93
3.3.1. Fatores morfogenéticos	95

Capítulo 4 – Processos de manipulação da forma estrutural

4 Preâmbulo	97
4.1 Geração da forma estrutural	97
4.2 “Form Finding” – pesquisa da forma estrutural	99
4.3 Estática Gráfica	102
4.4 Modelos Físicos	107
4.4.1 Princípios da Inversão e de Construções Suspensas	110
4.4.1.1 Antoni Gaudí	110
4.4.1.2 Heniz Isler	112
4.4.1.3 Frei Otto	114
4.4.1.3.1 Modelo em rede	115
4.4.1.3.2 Modelos de películas de sabão	118
5.5 Processos digitais de estática gráfica	122
5.5.1 Axiel Kilian	123
5.5.2 Philippe Block	125

Capítulo 5 – Aplicação da tecnologia digital em arquitetura

5 Preâmbulo	130
5.1 Modelos de representação – alográfico e autográfico	130
5.2 Evolução das ferramentas CAD	137
5.3 Projeto arquitetónico digital	141
5.4 Evolução dos processos de conceção digital	144
5.4.1 Modelos de conceção e modelos de conceção digital	145
5.5 Modelo de Rivika Oxman	146
5.5.1 Modelo conceptual com suporte em papel	148
5.5.2 Modelo CAD	148
5.5.3 Modelo CAD (descritivo)	149
5.5.4 Modelo CAD (geração)	153
5.5.5 Modelos de formação	154
5.5.5.1 Modelos de formação topológicos	157

5.5.5.2 Modelos de formação de design associativo	159
5.5.6 Modelo de conceção generativa	160
5.5.6.1 Modelo de conceção de transformação gramaticais	161
5.5.6.2 Modelo de conceção evolutiva	163
5.5.7 Modelo de desempenho	163
5.5.7.1 Modelos de formação baseados no desempenho	165
5.5.7.2 Modelo de geração baseados no desempenho	167
5.5.8 Modelos compostos	168
5.6 Modelo José Duarte et al.	169
5.7 Modelo Mitchell & McCullough	170
5.8 Modelo Kieram – da produção em série à personalização em massa	171
5.9 conclusão	174

Capítulo 6 – Produção em arquitetura

6 Preâmbulo	177
6.1 Introdução	177
6.2 Condição de produção manual	178
6.2.1 A arquitetura e a condição manual	179
6.2.2 Condição de produção	181
6.3 Condição de produção Mecânica	183
6.3.1 Arquitetura – condição mecânica	184
6.3.2 Condição de produção	187
6.4 Condição de produção Digital	188
6.4.1 Arquitetura	189
6.4.2 Condição de Produção – personalização em série	192
6.5 Fabricação digital	194
6.5.1 Definições de prototipagem digital e fabricação digital	197
6.5.2 Prototipagem Rápida	198
6.5.3 Processos de fabricação aditiva	199
6.5.4 Processos de fabricação subtrativos	203
6.5.5 Processos de Fabricação Formativa	207
6.5.6 Processos de Fabricação Robótica	209

Capítulo 7 – Alvenaria cerâmica

7.1 Introdução	213
7.2 Alvenaria Estrutural até ao séc. IXX	214
7.3 Alvenaria Estrutural séc. XX	215
7.4 Alvenaria Estrutural Contemporânea - Abóbadas do Séc. XXI	218
7.4.1 Brick-topia, Map13	224
7.4.2 SUDU, Etiópia, 2010, Block Research Group	232

Capítulo 8 – Paradigma operativo para a utilização de meios digitais na conceção e construção de superfícies curvas

8.1 Preâmbulo	241
8.2 Taxionomia	251
8.3 Paradigma operativo	252
8.4 Teoria de projeto	257
8.5 Técnica	263
8-5.1 Utilização	263
8.5.2 Significação	264
8.5.2.1 Significação da arquitetura pela estrutura	264
8.5.2.2 Significação da arquitetura através do material	269
8.5.3 Geração e produção	273
8.5.4 Materialização	275
8.6 Fase A	276
8.6.1 Composição	276
8.7 Fase B	280
8. 7.1 Gravítica da forma	280
8.8 Fase C	290
8.8.1 Envelope construtivo	290
8.8.2 Validação estrutural	297
8.8.3 Tesselation / paginação da forma	299
8.9 Fase D	300
8.9.1 Forma construtiva	300
8.10 Conceito de forma-Síntese ou tecno-estrutural	309
8.11 Fase E	310
8.11.1 Montagem/Construção	310
8.12 Sistema Brick-Warp	311
8.13 O Direito e a Legislação, na perspetiva e na atividade do Arquiteto	312
8.14 Contextualização teórica ideológica – <i>Design morfogenético</i>	317

Capítulo 9 – Sistema construtivo Brick-warp

9.1 Preâmbulo	322
9.2 Opção tecnológica	325
9.3 Computação e o Vernacular	326
9.4 Constituição do sistema construtivo	327
9.5 Caso prático I	329
9.6 Caso prático II	338
9.6.1 Processo de desenho	338
9.6.2 Análise e avaliação da forma	341
9.6.3 Algoritmo	342
9.6.4 Form-finding e análise estrutural	344
9.6.4.1 RhinoVAULT	345
9.6.4.2 Método dos elementos finitos	345
9.6.5 Tecelagem/paginação e numeração das peças	348
9.7 Processo de fabricação	349
9.7.1 Moldes	349
9.7.2 Manufatura dos módulos cerâmicos	352
9.7.3 Secagem dos módulos cerâmicos	353
9.7.4 Customização dos módulos cerâmicos	356
9.7.5 Verificação das peças	354
9.7.6 Cozedura dos módulos cerâmicos	356
9.8 Montagem	359
9.9 Logística de produção	361

Capítulo 10 – Conclusão

10.1 Sumário	364
10.1.1 Objetivos gerais	363
10.1.2 Teoria da arquitetura v.s. Tecnologias digitais	365
10.1.3 Tecnologias digitais v.s. Tectónica	373
10.1.4. Fenomenologia estrutural v.s. Tectónica	375
10.1.5. Teoria da arquitetura vs Fenomenologia estrutural	378
10.2 Verificação das hipóteses gerais	380
10.3 Objetivos específicos ou parciais	387
10.4 Hipóteses específicas	387
10.5 Contributos	394
10.5.1. Constatações	394
10.5.2. Contributos genéricos	395

10.5.3. Contributos específicos	397
10.5.4. Contributos fundamentais	398
10.6 Trabalhos futuros	399
10.7 Conclusão final	400

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1: Fluxo de forças ao longo da forma estrutural

"MLK jr. Park Stone Vault, Austin, Tx, USA, 2010-2013" (Image) (n.d.) Accessed 28 Novembrer 2017 <<http://block.arch.ethz.ch/brg/project/mlk-jr-park-stone-ault-austin-tx-usa>>).

Figura 1.2: Construção do museu Guggenheim, Bilbao, 1997, arquiteto Frank Gehry

"Aço na Construção: Museu Guggenheim" (Image) (n.d.) Accessed 28 Novembrer 2017<<http://wwwo.metalica.com.br/aco-na-construcao-museu-guggenheim-bilbao>>).

Figura 1.3: Ginásio Don Bosco, Montevideo, Uruguai, 1984, Eladio Diest

"Material Tour de Force: The work of Eladio Dieste" (Image) (2014) (n.d.) Accessed 28 Novembrer 2017 <<https://archleague.org/article/material-tour-de-force-the-work-of-eladio-dieste/>>).

Figura 1.4: Abóbada em alvenaria, Suíça, Zurique, 2011, BRG, ETH

("Catalan thin-tile vault" (Image) (2011) (n.d.) Accessed 28 Novembrer 2017 <<https://http://flickrhivemind.net/Tags/vault,zurich/Interesting>>).

Capítulo 2

Figura 2.1: Desenho global da investigação

(Esquema do autor) (2018)

Figura 2.2: Diagrama do método hipotético dedutivo, formulado por Popper

"O método hipotético-dedutivo" (Image) (2013) Accessed 05 Novembrer 2018 <<https://livrepensamento.com/2013/10/01/o-metodo-hipotetico-dedutivo/>>).

Figura 2.3: Representação em quatro fases do ciclo básico da investigação-ação

Tripp, David (2005) 'Action research: a methodological introduction', Educação e Pesquisa.

Capítulo 3

Figura 3.1: Representação gráfica do conceito *força* (direção, sentido, intensidade, ponto de aplicação)

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.2: Princípio do equilíbrio básico de forças (ação reação)

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.3: Princípio do equilíbrio básico de forças aplicado a um corpo

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.4: Modelo de Hooke, 1642

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.5: Esquema de deslocamento da força ao longo dos átomos, “o *caminhar da força*”

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.6: Funcionamento estrutural da viga

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.7: Rotação (Momento Externo Aplicado)

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.8: Contra rotação (Momento Equilibrante)

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.9: Modelo geométrico de rotação

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.10: Momento fletor – deformação

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.11: Ineficiência do momento fletor

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.12: Tríade relacional de forma/material/vão livre

Gonzales, Filipe (2006) “Geometrias da arquitetura de terra. Lisboa: Universidade Lusiada.

Figura 3.13: Estação de serviço, Heinz Isler, Deltingen, Suíça, 1969

Isler, Heinz (1969) “Descobre ideias sobre Asas” Matsys (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2016 <<https://www.pinterest.pt/pin/67342956901409600/>>.

Figura 3.14: Abóbada cilíndrica da estação de serviço, Eládio Diest, Salto, Uruguai, 1955

Diest, Eládio (1955) “Descobre ideias sobre Asas” Matsys (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2016 <<https://www.pinterest.pt/pin/67342956901409593/>>.

Figura 3.15: Ciclo de transporte da força ao longo da peça arquitetónica

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.16: Processo conceptual em que o espaço dialoga com a estrutura, igreja colonial Güell, Gaudí, Barcelona, Catalunha, 1898

A Osteologia na arquitectura de Gaudí: Casa Battló, casa Milá, Parque Güell, Colonia Güell e Sagrada Família” (Image) (n.d.) Accessed 2017 15 December 2016 <https://www.ULFABA_TES712.pdf>.

Figura 3.17: Restaurante Los Manantiales, Felix Candela, Cidade do México, 1958

Candela, Felix (1958) “Descobre ideias sobre Asas” Matsys (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2013 <<https://www.pinterest.pt/pin/67342956901409593/>>.

Figura 3.18: Estudo do processo de colapso da abóbada em MLK Jr. Park Vault

MLK Jr. Park Stone Vault (2012) “Innovating structural masonry” ETH Zurich (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2013 <https://block.arch.ethz.ch/brg/files/20131011-mlk-jr-park-stone-vault-tx_1381503449.pdf>.

Figura 3.19: Modelo de Tensegrity, Buckminster Fuller

Fuller, Buckminster (2018) “ Tensegrity Structures: What they are and what they can be” ArchDaily (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2013 <<https://archdaily.com/893555/tensegrity-structures-what-they-are-and-what-they-can-be>>.

Figura 3.20: Esquema do trabalho interno esforço normal, Macdonald

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 3.21: Esquema do trabalho interno Momento Fletor

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 3.22: Dinamica formal

(Esquema do autor) (2018)

Figura 3.23: Acção da gravidade sobre uma tira de papel

Firmo, Célio da Silveira (2003) "*Estruturas tubulares enrijecidas por superfícies de dupla curvatura*" Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2016 <http://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/celiofirmomm.pdf>.

Figura 3.24: Aplicação de força nos polos de um ovo

Vasconcelos, Yuri (2017) "Por que não dá para quebra um ovo na vertical com as mãos?" Super interessante (Image) (n.d.) Accessed 10 December 2015 <<http://www.super.abril.com.br/mundo-estranho/por-que-nao-da-para-quebrar-um-ovo-na-vertical-com-as-maos/>>

Figura 3.25: Eficiência estrutural das formas naturais

Isler, Heinz (2009) "Eficiência estrutural das formas naturais" (Image) (n.d.) Accessed 15 December 2017 <http://www.google.com/search?q=Schalentragerwerk+von+Heinz+Isler&oq=Schalentragerwerk+von+Heinz+Isler&aqs=chrome..69i57j1168j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>.

Capítulo 4

Figura 4.1: Modelo da cúpula da catedral da cidade de Aachen

Jacobo, GJ (2014) "El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen", Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina (Image) (2004) Accessed 05 May 2017 <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>>.

Figura 4.2: Decomposição forças descritas por Leonardo Da Vinci

Jacobo, GJ (2014) "El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen", Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina (Image) (2004) Accessed 05 May 2017 <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>>.

Figura 4.3: Composição e decomposição de forças segundo Pierre Varignon

Jacobo, GJ (2014) "El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen", Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina (Image) (2004) Accessed 05 May 2017 <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>>.

Figura 4.4: Relação estabelecida entre o polígono de forças e os funiculares

Jacobo, GJ (2014) “El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”,
Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina
(Image) (2004) Accessed 05 May 2017
<<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf> >.

Figura 4.5: Grua metálica, segundo o desenho estrutural otimizado de Ritter

Jacobo, GJ (2014) “El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”,
Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina
(Image) (2004) Accessed 05 May 2017
<<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf> >.

Figura 4.6: Estudo de esforço interno de uma treliça com o método gráfico de antifuncular das cargas

Jacobo, GJ (2014) “El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”,
Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina
(Image) (2004) Accessed 05 May 2017
<<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf> >.

Figura 4.7: Antifuncular das Cargas

Jacobo, GJ (2014) “El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”,
Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina
(Image) (2004) Accessed 05 May 2017
<<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf> >.

Figura 4.8: Desenhos Marques da Silva, Atelier Laloux, Paris, 1890-1896

Silva, Marques (2018) “Desenhos Marques da Silva, Atelier Laloux, Paris, 1890-1896”
Fundação Instituto Marques da Silva Accessed 2018
<http://www.fims.up.pt/index.php?cat=44>>.

Figura 4.9: Geração das “formas naturais”, catenária e arco parabólico equivalente

Remo Pedreschi (2008) Form, Force and Structure – A Brief History Versatility and AD -
Vicissitude March/April 2008 p.12

Figura 4.10: Transformação de uma catenária simples em abóbadas estruturais mais complexas e eficientes

Jouca, Riyad and Francis, Jack (2012) *Hybios_Hybrid Biostructures Architectural Association of Architecture*

Figura 4.11: Modelos gráficos produzidos Giovanni Poleni, (a) analogia arco parabólico e catenária, (b) Analise gráfica realizada em 1748 à cúpula da Catedral de São Pedro

Block, Philippe et al (2006) "As hangs the flexible line: Equilibrium of masonry arches" Nexus Network Journal (Image) (2004) Accessed 05 May 2017 <http://www.researchgate.net/publication/225587685_As_Hangs_the_Flexible_Line_Equilibrium_of_Masonry_Arches>.

Figura 4.12: Modelo de suspenso feito com correntes; Modelo invertido de correntes para projectar abóbada; Demonstração da inversão de uma catenária para calcular a linha de pressão de um arco

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.13: Parque Guell, Análise do comportamento estrutural do muro de contenção

"Park Guell – Gaudí House Museum", (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <<http://www.casamuseugaudi.org/en/park-guell/>>.

Figura 4.14: Modelos funiculares realizados para a Sagrada Família, Barcelona, 1898-1908, Antoni Gaudí

Gaudí, Antoni (2011) "Funicular Structures: Antoni Gaudí and the Cripta de la Colònia Güell", Word Press (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <<https://structuresandspans.wordpress.com/2011/12/21/funicular-structures-antoni-gaudi-and-the-cripta-de-la-colonia-guell/>>.

Figura 4.15: Geração de forma através da utilização da utilização de uma membrana invertida

Isler, Heinz (2014) "Fabric model study chiltern – Exemplary Projects [Cold Harbour] by Charlotte Cooper" (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <https://www.researchgate.net/publication/225587685_As_Hangs_the_Flexible_Line_Equilibrium_of_Masonry_Arches>.

Figura 4.16: Métodos utilizados por Isler na conceção de cascas, avaliação e medição da casca

Chilton, John (2000) "The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture HEINZ ISLER", Riba publications.

Figura 4.17: Conjunto de cascas concebidas por Isler, retiradas de um vasto lote de soluções que conceptualizou, 1961

Chilton, John (2000) "The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture HEINZ ISLER", Riba publications.

Figura 4.18: Modelo de construção de cobertura suspensa feito com correntes

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser

Figura 4.19: Modelo funicular desenvolvido para o pavilhão, Mannheim, Alemanha, 1975, Otto

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.20: Modelo de mediação da fotografia através da câmara fotográfica linhof, Processo de dupla exposiçãoo fotográfica utilizado para medição da deformação, medição das forças nas extremidades da cobertura

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.21: Abóbada criada a partir de tiras de tecido endurecidas com gesso
Figura 76: Modelo suspenso para o estudo morfológico e estrutural do projeto de Mannheim

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.22: Interior Multihalle de Mannheim, 1971, Mutscher, Langer e Frei Otto

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.23: Exemplo do exercício de caminhos mínimos. Cada ponto é ligado de forma a criar uma malha radiocêntrica, Lamelas de sabão desenham a ligação redutora entre os diversos pontos

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.24: Modelo de película de sabão em forma de onda estrelar (esquerda) aplicação em da forma gerada, Bundesgartenschau Köln, 1957 (direita)

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.25: Exemplos de deformação paramétrica por ação do meio, realizados por D'Arcy Thompson

Cruz, André (2012) "Arquitectura (bio) lógica. Uma Análise Da Obra De *Frei Otto*", Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra Departamento de Arquitectura, (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <<http://www.3viajesaldia.com/wpcontent/uploads/2009/06/kheopspyramid.jpg?9d7bd4>>.

Figura 4.26: Sinopse gráfica de relação entre forma, força, massa, material em diferentes sistemas estruturais da Natureza. Frei Otto, IL 23

Nerdinger, Winfried (2005) *Frei Otto. Complete Works: Lightweight Construction - Natural Design*. London: Birkhäuser.

Figura 4.27: Análise da capacidade estrutural da cúpula que suporta o piso reformulado

Jacobo, GJ (2014) "El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen", Faculdade de Universidade e Urbanismo - Universidade Nacional do Nordeste da Argentina (Image) (2004) Accessed 2017 <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf>>.

Figura 4.28: Overview of the tool, showing mesh and string models as well as flattened patterns linked to the live form finding model

Killian, Axel (2004) "E Linking Digital Hanging Chain Models to Fabrication", Massachusetts Institute of Technology (Image) (n.d.) Accessed 2017 <http://www.researchgate.net/publication/30871582_Linking_Digital_Hanging_Chain_Models_to_Fabrication>.

Figura 4.29: Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa, Portugal, 1499-1528; King Henry VII's Lady Chapel, Westminster Abbey, Londres, Inglaterra, 1503-1519; Pfarrkirche, Königswiesen, Áustria, 1520

Block, P (2009) "Block Research Group" - Institute of Technology in Architecture at ETH (Image) (2004) Accessed 2017 <<http://www.block.arch.ethz.ch/brg/people/philippe-block>>.

Figura 4.31: Thrust Network Analysis, a grade primária (Γ) e a grade dual (Γ^*) estão relacionadas por uma relação recíproca. O equilíbrio do nó é garantido pela existência de um polígono fechado

Block, P (2009) "Thrust Network Analysis" - Massachusetts Institute of Technology Department of Architecture at MIT (Image) (n.d.) Accessed 2017 <<http://www.web.mit.edu/masonry/thrustNetwork/#ABSTRACT2>>.

Figura 4.32: Análise produzida pelo RhinoVault para a abóbada de alvenaria de pedra MLK Jr., Austin, TX, USA, 2010-2013

Block, P (2007) "Thrust Network Analysis" - Massachusetts Institute of Technology Department of Architecture at MIT (Image) (2004) Accessed 30 July 2017 <<http://www.web.mit.edu/masonry/thrustNetwork/#ABSTRACT2>>.

Figura 4.33: Manipulação formal da superfície a partir de uma malha retangular

Block, P (2007) "Thrust Network Analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium" - Massachusetts Institute of Technology Department of Architecture at MIT (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<http://www.web.mit.edu/masonry/thrustNetwork/images/example04/index.html>>.

Capítulo 5

Figura 5.1: Villa Almerico e representações gráficas, Andrea Palladio

Palladio, A (2015) "Biografia do Arquiteto Andrea Palladio" - Enciclopedia Biográfica de Asquitas e Arquitetos digital (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<http://www.ebad.info/palladio-andrea> ACT2)>.

Figura 5.2: Sistema Sketchpad, Instituto de tecnologia de Massachusetts

Sutherland, I. (2008) História da computação gráfica: Sketchpad (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://computacaograficaecinema.wordpress.com/2013/07/05/historia-da-computacao-grafica-sketchpad-a-man-machine-graphical-communication-system-2/>>.

Figura 5.3: Aplicação do Sistema CATIA, museu Guggenheim

Vaulted, M (2008) "How Analog and Digital Came Together in the 1990s Creation of the Guggenheim Museum Bilbao (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.guggenheim.org/blogs/checklist/how-analog-and-digital-came-together-in-the-1990s-creation-of-the-guggenheim-museum-bilbao> >.

Figura 5.4: Sistema Catia permite a transposição dos modelos físicos para uma informação gráfica digital

Grey, G (2008) "A Fish Is Kind of Aerodynamic – A conversation between Greg Lynn and Rick Smith"-Origins of the Digital (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017<<http://www.cca.qc.ca/en/issues/4/origins-of-the-digital/39920/a-fish-is-kind-of-aerodynamic>>.

Figura 5.5: Hipótese de funcionamento estrutural da escada em construção na igreja

Grimshaw (n.d.) Estação Waterloo, Londres Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://grimshaw.global/projects/international-terminal-waterloo>>.

Figura 5.6: Terminal Portuário Internacional de Yokohama, Japão, Foreign Office Architects, 2002

Langdon, D (2018) "Clássicos da Arquitetura: Terminal Internacional de Passageiros De Yokohama /Foreign Office Architects" - Arch daily(Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017<<http://www.archdaily.com/554132/ad-classics-yokohama-international-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa>>.

Figura 5.7: Esquema generico

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.8: Esquema generico: símbolos, limites, direções

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.9: Modelo de suporte em papel

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.10: Modelo CAD

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.11: Modelo e protótipo de estrutura em taça, México, 1888, Félix Candela

Candela, Felix (1958) "Descobre ideias sobre Asas" Matsys (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.pinterest.pt/pin/67342956901409593>>.

Figura 5.12: Modelo e protótipo de estrutura em taça, México, 1888, Félix Candela

Gaudi, A. "Park Guell – Gaudí House Museum", (Image) (2016). Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017<<http://www.casamuseugaudi.org/en/park-guell/>>.

Figura 5.13: Ferramentas desenvolvidas por Heinz Isler para aumentar o rigor de medição dos seus protótipos, de modo a garantir rigor na mudança de escala

Pereira, V. (2015) "Design e Aplicações de Estruturas em Casca de Formas Livres Ultrafinas" Instituto Superior Técnico, (Image) (2016) Accessed 30 July 2017<http://www.isler.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043834664/Tese_69796_Design%20e%20Aplicacoes%20de%20Estruturas%20em%20Casca%20de%20Formas%20Livres%20Ultrafinas.pdf>.

Figura 5.14: Sequência de colapso da abobada sem reforço estrutural, forma impressa em 3D, MLK Jr. Park Vault (escala 1:33).1888, Austin, TX, USA, Block Research Group

Vault, P.J. "Collapse of masonry structures", (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017<<http://www.block.arch.ethz.ch/brg/project/mlk-jr-park-stone-vault-austin-tx-usa>>.

Figura 5.15: Museu Marta Herford, Bielefeld, Alemanha, 2001, Frank Gehry

"Project Authors", Archilovers. (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017<<http://www.archilovers.com/projects/178147/marta-herford.html>>.

Figura 5.16: Projeto de Herford modelo físico e o modelo digital

Pupo, R. (2009) "Inserção da Prototipagem e Fabricação Digital no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura", Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitectura e Urbanismo, Accessed 2017 <<http://www.ome.fa.utl.pt/~progfabarq/tese.pdf>>.

Figura 5.17: Modelo de avaliação

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.18: Modelo de formação

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.19: Museu da Mercedes-Benz, Estugarda, Alemanha, 2017, UNStudio

Mercedes-Benz, (2018) "Stuttgart in 1, 2, 3 days: Our recommendations" Stuttgart-Markting (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.stuttgart-tourist.de/en/a-mercedes-benz-museum>>.

Figura 5.20: Forma trifóide. Fonte: Veras, 2012. Modelo paramétrico do museu Museu da Mercedes-Benz. Fonte (Aranda; Lasch (2008, p.170) Lasch, A. (2008)

"Mercedes Museum, Stuttgart" Accessed 2017 <https://www.laschmuseum.org.uk/?page_id=1862>.

Figura 5.21: Modelo generativo

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.22: Esquema e modelo conceptual do pavilhão Serpentine Gallery, 2002, Londres, Inglaterra, Toyo Ito

Pereira, S. (2013) "Pavilhões de Verão da *Serpentine Gallery* – o espaço arquitectónico em exposição" Universidade da Beira Interior Engenharia (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<http://www.ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3129/1/Dissertacao.pdf>>.

Figura 5.23: Modelo de formação baseado no desempenho

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.24: Greater London Authority Headquarters, Londres, Inglaterra, 2002, Foster & Partners

Andreza, M. (2002) "Greater London Authority interior, London" Pinterest Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.dpreview.com/galleries/7505314448/photos/703648>>.

Figura 5.25: Edifício Swiss RE, Londres, Inglaterra, (2004), Foster & Partners

Andreza, M. (2002) "Greater London Authority interior, London" Pinterest Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.dpreview.com/galleries/7505314448/photos/703648>>.

Figura 5.26: Modelo generativo baseado no desempenho

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.27: Esquemas generativos do Terminal Rodoviário de Nova Iorque, Estados Unidos da América, 1999, de Greg Lynn

(Lynn, G (1999) "Terminal Rodoviário de Nova York" Desigboom Accessed 2017 <<https://www.designboom.com/architecture/greg-lynn-korean-presbyterian-church-of-new-york/>>.

Figura 5.28: Modelo composto

Oxman, R (2006) "Theory and design in the first digital age" Elsevier Ltd Accessed (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < <https://www.arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.pdf>>.

Figura 5.29: José Duarte et al, processos disciplinares e cursos

Duarte, J et al. (2011) "Processos disciplinares e interação destes com os cursos ministrados no programa de pré-graduação do Instituto Superior Técnico" (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.tecnico.ulisboa.pt/pt/sobre-o-tecnico/institucional/historia/>>.

Figura 5.30: Diagrama adaptado de Mitchell e McCullough (1994)

Mateus, L et al. (2012) "Casos de estudo no "Convento de Cristo": registo e documentação Case Studies in "Convento de Cristo": recording and documentation *Universidade Técnica de Lisboa - CIAUD/Faculdade de Arquitectura* (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.home.fa.utl.pt/~lmmateus/publicacoes/3368-8374-1-PB.pdf>>).

Figura 5.31: Linha de montagem Ford modelo T

Azcárate, F. (2010) "Os 100 anos do caminhão modelo T e os 90 anos da Ford A" Exame Accessed 2017 <https://www.exame.abril.com.br/negocios/ha-um-seculo-a-linha-de-montagem-da-ford-mudava-a-sociedade/>>.

Figura 5.32: A estratificação e a segregação em arquitetura – Promovendo a inteligência coletiva

Kleran, F. And Timberlake (2004) "A estratificação e a segregação em arquitetura– Promovendo a inteligência coletiva" Dissertação para a obtenção de grau de mestre em Arquitectura Instituto superior Tecnico de Lisboa Exame (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ucin1491317788624486&disposition=inline)>.

Capítulo 6

Figura 6.1: Estrutura modelar estandardizada, Crystal Palace 1851, Joseph Paxton

Mugayar, B. (2011) "Arquitetura do Ferro" Dissertação para a obtenção de grau de mestre em Architectura Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Architectura e Urbanismo (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017

<<https://books.google.pt/books?id=dXBcjKgVWPwC&pg=PA29&lpg=PA29&dq=#v=onepage&q=Estrutura%20modelar%20estandardizada%2C%20Crystal%20Palace%201851%2C%20Joseph%20Paxton&f=false>>.

Figura 6.2: Réplica do computador Z3

Foster, D. (2013) "História of computing hardware" U. S. Institute of Museum and Library Services. (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017

<https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computing_hardware#mediaviewer/File:Z3_Deutsches_>.

Figura 6.3: Superfícies cúbicas obtidas a partir de impressão 3D, resultam de uma fórmula de terceiro grau com 21 coeficientes

Exposição formas e formulas, Museu Nacional de História Natural e da Ciência, 2013. (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.museus.ulisboa.pt/pt-pt/exposicao-formas-e-formulas>>.

Figura 6.4: Criação de protótipo, ciclo dos processos de fabricação aditiva

Ferro, Beatriz (2015) "Como se Produz um Metal? Prototipagem Rápida" Relatório desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Projeto FEUP Faculdade de Engenharia do Porto (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.docplayer.com.br/51762508-1-como-se-produz-um-metal-1-1-prototipagem-rapida.html>>.

Figura 6.5: De Young Museum, São Francisco, California, 2005, Herzog & de Meuron

Herzog, M. and Meuron (2005) ".De Young Museum, São Francisco, California" ArchDaily Accessed 2017 <<https://www.archdaily.com/66619/m-h-de-young-museum-herzog-de-meuron>>.

Figura 6.6: Fresadora Modelo Miller com exemplos de aplicação em madeira

Celani, G (2005) "Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura" Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/pupo-celani2009.pdf>>.

Figura 6.7: Fresadora Modelo Miller Denford Miller com exemplos de aplicação em metal

Celani,G (2005) “ Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura” Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.Digital Design Fabrication Group> >.

Figura 6.8: Superfícies geradas pelo sistema FlexiMoldt

Celani,G (2005) “ Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura” Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.Digital Design Fabrication Group> >.

Figura 6.9: Kunsthaus, Graz, Austria, 2003 , Spacelab Cook-Fournier

Precedence Study Kunsthaus (n.d.) (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 < http://www-bcf.usc.edu/~kcoleman/Precedents/ALL%20PDFs/Spacelab_KunsthausGraz>.

Figura 6.10: A superfície complexa foi fabricada através de processos subtrativos de fresagem robótica de blocos de madeira, Norwegian Wild Reindeer Center (2011) dos Snøhetta

Oliveira,M (2012) “Arquitetura e Personalização o Impacto das Tecnologias CAD/CAM” Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.Digital Design Fabrication Group> >.

Figura 6.11 – Utilização de braço robótico

Souza, M. (2013) “Arquitetura Industrial, Bloco, Tijolos” Archinect (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.abitare.it/en/research/studies/2015/08/24/achim-menges-and-the-experimental-pavilion-in-stuttgart/>>.

Figura 6.12 – Gantenbein Vineyard (Gramazio + Kohler). Processo de pré-fabricação robótica dos painéis de alvenaria de tijolo.

Kohler, G. (2016) “Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland. Non-Standardised Brick Façade” Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Switzerland Archinect (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/52.html>>.

Capítulo 7

Figura 7.1: Abóbada romana com cofragem, abóbada Núbia, abóbada catalã

Block, P. and Matthias Rippmann (2013) "Detail Zeitschrift für Architektur Review of Architecture 53." Serie 2013 · 5 Einfach und Komplex (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2016 <https://www.block.arch.ethz.ch/brg/files/2013-detail-block-rippmann-katalanisches-gewoelbe_1396861318.pdf>.

Figura 7.2: Masion Jaoul, 1956, arq. Le Corbusier

Machado, Andréa Soler (2016) "Masion Jaoul" Gramazio Kohler Research, ETH Zurich, Switzerland Archinect (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2016 <<https://www.google.pt/search?q=Maison+Jaoul+arq.+Le+Corbusier&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwim2JTC0ZnZAhXBOxQKHRmYD84QsAQIKg&biw=1250&bih=654&dpr=1.25#imgsrc=oGxQXhe83GbBM:>>>.

Figura 7.3: Cobertura da Igreja San Pedro, Durazo, Urugai, 1969, Eladio Diest (esq)

Fábrica Domingo Massaro, Canelones, Urugai, 1969 Eladio Diest (dir)

Palacio, J. (2012) "Material tour de force: The work of Eladio Dieste" Archleague (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2016 <<https://www.archleague.org/article/material-tour-de-force-the-work-of-eladio-dieste/>>.

Figura 7.4: Caracterização construtiva do processo de pré-esforço utilizado por Eladio Dieste.

Remo, P. (2000) "The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture" Eladio Diest Riba publications.

Figura 7.5: Macaco de pré-esforço concebido por Eladio Dieste

Pedreschi, J. (2012) "The Structural Behaviour and Design of Free-Standing Barrel Vaults of Eladio Dieste" Department of Architecture (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2016 <<https://www.arct.cam.ac.uk/Downloads/ichs/vol-3-2451-2468-pedreschi.pdf>>.

Figura 7.6: Abóbada em alvenaria, Zurique, 2011, BRG, ETH

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Architecture Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <[dx.doi.org/10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.7: Painel de apresentação, workshop realizado Universidade de Tecnologia de Sidney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich

Lauman, J. and Jordan Soriot (2012) "Painel de apresentação" Universidade de Tecnologia de Sidney – UTS (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017 <<http://bejlt.brookes.ac.uk/paper/pass-me-the-mixing-bucket-the-ribbed-catalan-studio-as-a-designresearch-case-study/>>.

Figura 7.8: Configuração das nervuras da superfície, realizado Universidade de Tecnologia de Sidney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich

Block, Philippe et al (2006) "Configuração das nervuras da superfície" Nexus Network Journal (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017<<https://bejlt.brookes.ac.uk/paper/pass-me-the-mixing-bucket-the-ribbed-catalan-studio-as-a-designresearch-case-study/>>.

Figura 7.9: Conceção dos perfis das nervuras, realizado Universidade de Tecnologia de Sydney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich

Lauman, J. and Jordan Soriot (2012) "Painel de apresentação" Universidade de Tecnologia de Sidney – UTS (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017<<http://bejlt.brookes.ac.uk/paper/pass-me-the-mixing-bucket-the-ribbed-catalan-studio-as-a-designresearch-case-study/>>.

Figura 7.10: Brick-topia, fábrica Fabra i Coats, Sant Andreu, Barcelona, 2013, Map13

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.11: Pavilhão Brick-topia, diagramas de força produzidos pelo software RhinoVAULT

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.12: Brick-topia, espaços interiores

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.13: Brick-topia, Fábrica Fabra i Coats, Sant Andreu, Barcelona, 2013, Map13

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.14: Brick-topia, infraestrutura de construção, Barcelona, 2013, Map13

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.15: Brick-topia, primeira camada de tijolos

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.16: Brick-topia, aplicação das várias camadas de tijolos

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.17: Brick-topia, primeira camada de tijolos

Lopez, David et al (2016) "Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*" Department of Arrchitectura Informes de la Construcción (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017< [dx.doi.org /10.3989/ic.15.169.m15](https://doi.org/10.3989/ic.15.169.m15)>.

Figura 7.18: SUDU unidade habitacional sustentável, Etiópia, 2011, Block Research Group

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, suatainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017
<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 7.19: SUDU Uunidade habitacional sustentável, Etiópia, 2011, Block Research Group

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, suatainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017
<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 7.20: Exterior SUDU, unidade habitacional sustentável

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, suatainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017
<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 7.21: Interior SUDU, unidade habitacional sustentável

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, suatainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017
<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 7.22: Abóbadas de berço SUDU, unidade habitacional sustentável

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017

<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA >.

Figura 7.23: Construção dos diafragmas das Abóbadas de berço, SUDU

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017

<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA >.

Figura 7.24: Tirantes das Abóbadas de berço, SUDU

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017

<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA >.

Figura 7.25: Funcionamento estrutural da abóbada de berço

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017

<https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA >.

Capítulo 8

Figura 8.1: Ideograma do projeto do pavilhão Honey Scape

Festival Internacional de Jardins de Ponte de Lima (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017<<https://festivaldejardins.cm-pontedelima.pt/2012/honey-scape.php> >.

Figura 8.2: A forma estrutural do pavilhão Honey Scape, é suportado por cabos

Festival Internacional de Jardins de Ponte de Lima (Image) (n.d.) Accessed 05 May 2017<<https://festivaldejardins.cm-pontedelima.pt/2012/honey-scape.php> >.

Figura 8.3: Esquema taxionómico para a conceção das superfícies curvas

(Esquema do autor) (2018)

Figura 8.3: Paradigma operativo para a utilização de meios digitais na conceção e construção de superfícies curvas

(Esquema do autor) (2018)

Figura 8.5: O processo de projeto arquitetónico

Cunha, E. (2011) "O processo de projeto arquitectónico" (n.d.) Accessed 05 May 2017<[https:// researchgate.net/figure/Figura-1-O-processo-de-projeto-arquitetonico-Fonte-Modificado-de-Mahfuz-1995-p-32_fig1_298949145](https://researchgate.net/figure/Figura-1-O-processo-de-projeto-arquitetonico-Fonte-Modificado-de-Mahfuz-1995-p-32_fig1_298949145) >), p.32

Figura 8.6 : Sede Lloydsbank Londres, Inglaterra, 1986, Richard Rogers

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 8.7: Sede Lloydsbank Londres, Inglaterra, 1986, Richard Rogers

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 8.8: Edifício da sede da Renault, Swindon, Inglaterra, 1982, Norman Foster

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 8.9: Átrio Lloyds Bank, Londres, Inglaterra, 1978, Norman Foster

Macdonald, Angus (2001) Structure And Architecture. Melbourne: Architectural Press.

Figura 8.10: Cortes Fundação Joan Miró, 1975, Barcelona, arq. Josep Lluís Sert

Arch daly (2006) AD Classics: Fundació Joan Miró / Josep Lluís Sert (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018< <https://www.archdaily.com/796057/ad-classics-fundacio-joan-miro-josep-lluis-sert>>

Figura 8.11: Fundação Joan Miró, 1975, Barcelona, arq. Josep Lluís Sert

Arch daly (2006) AD Classics: Fundació Joan Miró / Josep Lluís Sert (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018< <https://www.archdaily.com/796057/ad-classics-fundacio-joan-miro-josep-lluis-sert>>.

Figura 8.12: Abóbada de forma livre, 2010, Zurique, Suíça, BRG

BRB (2010) Free-form tile vault, Zurich, Switzerland, 2010 (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<http://block.arch.ethz.ch/brg/>>

Figura 8.13: Abóbada Armadillo, acabamento do extradorso e intradorso, Venice Architecture Biennale , Veneza, Italia, 2016, BRG

BRB (2010) Free-form tile vault, Zurich, Switzerland, 2010 (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<http://block.arch.ethz.ch/brg/>>

Figura 8.14: Esquícios de Álvaro Siza Vieira, para o Pavilhão de Exposições nos Jardins de Anyang, Coreia do Sul (em cima); Esquissos de Frank O. Gehry, Guggenheim, Bilbao, Espanha (em cima)

SlidePlayer (n.d.) Desenho de síntese (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018<<https://slideplayer.com.br/slide/3330948/>>.

Figura 8.15: O processo de construção utilizando cofragens lineares.

Betonagem de uma das duas superfícies hiperbólicas

Princeton University art Museum (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://artmuseum.princeton.edu/legacy-projects/Candela/candela.html>>.

Figura 8.16: Escadas em espiral e alvenaria resistente realizadas pela Gustavino Company. Teste de carga com sacos de areia numa escada em construção na igreja do Cristo Cientista, Nova York, 1903, Rafael Gustavino

Guastavino, C. (2001) "Escadas em espiral e alvenaria resistente realizadas pela Gustavino Company" biblioteca Avery (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://www.studyblue.com/notes/note/n/masonry-03/deck/12500367>>.

Figura 8.17: Hipótese de funcionamento estrutural da escada em construção na igreja do Cristo Cientista, Nova York, 1903, Rafael Gustavino

Roca, P. et al. (2010) "Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches" CIMNE, Barcelona (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://www.link.springer.com/article/10.1007/s11831-010-9046-1>>.

Figura 8.18: Diagrama de momento fletor
(Esquema do autor) (2018)

Figura 8.19: Cemitério de Igualada, Catalunha, 1994, Enric Miralles (esq) Parlamento Escocês, Edimburgo, Escócia, 1997, Enric Miralles (dir)

Miralles, E. And Carme Pinós (2011) "Parque del Cementerio de Igualada" GRC studio (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <https://www.grcstudio.es/portfolio/p-l-o-t_-11-parque-del-cementerio-de-igualada-miralles-pinos/>.

Figura 8.20: Maqueta da opera produzida por Utzon do projeto inicial das cascas

Utzon, A (2013) "Maqueta da opera produzida por Utzon do projeto inicial das cascas" NSW government Accessed 2017 <www.gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/sydney-opera-house>

Figura 8.21: Evolução geométrica da casca 1957 - 1963

Utzon, J. (2010) "Opera House en Sydney. Control gráfico de formas y superficies de transición. La forma de las costillas del intrados." SOH na World Heritage List. (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/17lcc17de39.pdf;jsessionid=B7927A690D105892776BE1BE59A2E9C6?sequence=17>>.

Figura 8.22: Maqueta de teste das primeiras versões da casca de betão

Utzon, J. (2010) "Opera House en Sydney. Control gráfico de formas y superficies de transición. La forma de las costillas del intradoss." SOH na World Heritage List. (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018

<<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/17lcc17de39.pdf;jsessionid=B7927A690D105892776BE1BE59A2E9C6?sequence=17>>.

Figura 8.23: Princípio geométricos da casca Opera de Sidney 1957 – 1963

Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution: Dennis Wolanski Archive of the SOH, Sydney Opera House Trust (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018

<<https://www.sydneyoperahouse.com/content/dam/pdfs/Utzon-DesignPrinciples.pdf>>.

Figura 8.24: Configuração da seção transversal Opera

Utzon, J. (2010) "Opera House en Sydney. Control gráfico de formas y superficies de transición. La forma de las costillas del intrados." SOH na World Heritage List. (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018

<<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6559/17lcc17de39.pdf;jsessionid=B7927A690D105892776BE1BE59A2E9C6?sequence=17>>.

Figura 8.25: Elementos esferoidais pré-fabricados das abóbadas, Jørn Utzon

Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution: Dennis Wolanski Archive of the SOH, Sydney Opera House Trust (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018

<<https://www.sydneyoperahouse.com/content/dam/pdfs/Utzon-Design-principles.pdf>>.

Figura 8.26: Construção das abóbadas, Opera de Sidney

Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution: Dennis Wolanski Archive of the SOH, Sydney Opera House Trust (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://www.sydneyoperahouse.com/content/dam/pdfs/Utzon-Design-Principles.pdf>>.

Figura 8.27: Elementos construtivos do Centro Cultural Heydar Aliyev, Baku, Azerbaijão, 2007, Zaha Hadid

Arch daly (2013) Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects (Image) (n.d.) Accessed 05 February 2018 <<https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects>>.

Figura 8.28: Camadas construtivas do Heydar Aliyev Center

Arch daly (2013) Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018 <<https://www.archdaily.com/448774/heydar-aliyev-center-zaha-hadid-architects>>.

Figura 8.29: Estaleiro pavilhão dos desportos, Roma, Itália, 1960 Pier Luigi Nervi

Costruire Correttamente (n.d.) Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018
<http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/index.php?doc_id=141>

Figura 8.30: Ciclo construtivo pavilhão dos desportos, Roma, Itália, 1960 Pier Luigi Nervi

Costruire Correttamente (n.d.) Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018
<http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/index.php?doc_id=141>.

Figura 8.31: Processo construtivo do pavilhão dos desportos

Costruire Correttamente (n.d.) Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018
<http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/index.php?doc_id=141>.

Figura 8.32: Construção Centro Interpretativo do Parque Nacional de Mapungubwe, Africa do Sul, 2010, arq. Peter Rich; responsável técnico: John Ochsendorf, Michael Ramage

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018 <https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 8.23: Construção Centro Interpretativo do Parque Nacional de Mapungubwe, Africa do Sul, 2010, arq. Peter Rich; responsável técnico: John Ochsendorf, Michael Ramage

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018 <https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Figura 8.24: Formação profissional, da população local

Cherenet, Z. and Helawi Senet (2011) "Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design" EiABC (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018 <https://academia.edu/31317038/SUSTAINABILITY_AND_INNOVATION_IN_ARCHITECTURE_AND_DESIGN_ZEGEYE_CHERENET_HELAWI_SEWNET_BUILDING_ETHIOPIA>.

Capítulo 9

Figura 9.1: Módulo cerâmico, protótipo I

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.2: Construção do módulo

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.3: Gráfico de tração, compressão

Vitruvius (2002) Curvas de suspiro e barro. O tijolo recarregado (Image) (n.d.) Accessed 5 February 2018 <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/03.028/750/pt>>

Figura 9.4: Molde de cartão para ajuste das peças

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.5: Fixação por aparafusamento do módulo cerâmico à fita LT

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.6: Componentes do sistema, módulo cerâmico, cabo e ferragem de compressão

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.7: Cabo e ferragem geradora de compressão

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.8: Ferragem de clipagem, variação dimensional

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.9: Processo de clipagem, Funcionamento do cabo

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.10: Ciclo de montagem do arco

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.11: Algoritmo da superfície

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.12: Traçado funicular da abóbada

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.13: Análise estrutural feita com elementos finitos

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.14: testes de carga

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.15: Tacelos de prensagem

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.16: Primeira fase de produção dos tacelos

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.17: Segunda fase Produção dos tacelos

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.18: Tacelos de prensagem

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.19: Pressagem das peças cerâmicas

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.20: Processo de vazamento do modulo cerâmico

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.21: Secagem das peças cerâmicas

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.22: Processo de fresagem das peças cerâmicas

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.23: Montagem da abóbada sobre o suporte de ensaio

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.24: Mufla de cozedura

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.25: Modulos cerâmicos

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.26: Plataforma de suporte concebida para o sistema brick- warp

(Esquema do autor) (2018)

Figura 9.27 – Ciclo de montagem do sistema Brick-warp

(Esquema do autor) (2018)

Capítulo 10

Figura 10.1: Esquema da investigação

(Esquema do autor) (2018)

Figura 10.2: Espaço – Geometria – Forma estrutural

(Esquema do autor) (2018)

Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 : Características do processo Investigação-Ação

Tripp, David (2005) 'Action research: a methodological introduction', Educação e Pesquisa.

Capítulo 6

Tabelas 6.1: Técnicas de fabricação aditiva, Classificação de acordo com nomenclatura de Sousa

Sousa, José Pedro (2010): *From digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM technologies*, (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/pupo-celani2009.pdf>>.

Tabelas 6.2: Técnicas de fabricação subtrativas, Classificação de acordo com nomenclatura de Sousa

Sousa, José Pedro (2010): *From digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM technologies*, (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/pupo-celani2009.pdf>>.

Tabelas 6.3: Técnicas de fabricação formativas, Classificação de acordo com nomenclatura de Sousa

Sousa, José Pedro (2010): *From digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM technologies*, (Image) (n.d.) Accessed 30 July 2017 <<https://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/pupo-celani2009.pdf>>.

Capítulo 9

Tabela 9.1: Resultados dos testes de materiais (Atamturkur, 2006:119)

David López López (20029) Structural Analysis of Tile Vaulting: Method and Variables(Image)
(n.d.) Accessed 5 February 2018
<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/17891/Structural%20Analysis%20of%20Tile%20Vaulting.pdf>>.

Tabela 9.1: Resultados dos testes por Gustavino (Atamturkur, 2006:119)

David López López (20029) Structural Analysis of Tile Vaulting: Method and Variables(Image)
(n.d.) Accessed 5 February 2018<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/17891/Structural%20Analysis%20of%20Tile%20Vaulting.pdf>>

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Âmbito da tese

Esta tese aborda a temática da tectónica das formas estruturais curvas e de dupla curvatura, através da utilização de meios digitais na sua conceção e construção. As formas curvas possuem enorme potencial plástico, sendo por isso capazes de incrementar a qualidade e originalidade formal do espaço arquitetónico.

Este universo formal alia à complexidade geométrica, uma forte expressividade, potenciada pela eficiência do funcionamento estrutural que algumas tipologias destas superfícies curvas apresentam, como é o caso das superfícies parabólicas, concretamente arcos, abóbadas e cascas.

O trabalho desenvolvido visa contribuir para uma maior difusão e utilização das formas estruturais curvas na arquitetura contemporânea, se se quiser, visa potenciar na arquitetura o recurso à *geometria das superfícies curvas*.

Estas formas têm virtualidades que a arquitetura moderna tem frequentemente esquecido em virtude das suas múltiplas exigências, pois implicam conhecimentos transversais no âmbito da geometria, funcionamento estrutural e processos construtivos, que nem sempre são tidos em conta por parte da comunidade dos arquitetos.

importa, pois, relevar a importância e potencial deste universo formal, realizando uma investigação sobre o seu comportamento estrutural e processos construtivos, baseados num quadro operativo fornecido pelas ferramentas e processos digitais, os quais abrem assim, novas possibilidades no capítulo da manipulação, análise e construção do artefacto arquitetónico empregando superfícies curvas, consequentemente exponenciando a sua difusão.

A parca utilização destas formas decorre de causas várias, mas naturalmente que a variável *da adesão ao processo cognitivo e da familiaridade com a área do conhecimento* específico, desempenhou um papel determinante pois, decorrente da sua geometria, mais complexa que a das formas lineares, estas formas curvas ainda impõem uma abordagem integrada e dialética ao processo de conceção/construção.

A *conceção* da forma deve ser informada e atender aos respetivos imperativos tecnológicos. Com efeito, a sua utilização na arquitetura ao abarcar simultaneamente na *conceção*, o processo construtivo, implicará forçosamente, assumir-se sistematicamente como uma abordagem transversal e holística à questão referida.

O desenho da forma arquitetónica e da forma estrutural (a commumente denominada *estrutura*) implica deste modo, neste tipo de superfícies uma *conceção* transversal e simultânea por parte do arquiteto, as diferentes áreas do conhecimento, sendo o ato ideativo um exercício de síntese.

Assim, nesta tese discute-se, e defende-se, que uma *conceção* eficaz e eficiente da peça arquitetónica, exige que o ato de *ideação* tenha obrigatoriamente que englobar e integrar o carácter *portante* da forma estrutural para a forma final.

Para tal, o arquiteto necessita de deter *conhecimento* sobre o funcionamento da estrutura das *tipologias das formas estruturais básicas*, e da sua aptidão para produzir vão não necessitando em contraponto de deter o mesmo grau de conhecimento sobre cálculo e dimensionamento.

Uma primeira ilação desta dissertação é a de que o cálculo só se realiza após a forma estrutural definida. Quando se calcula a forma estrutural, já está, portanto, concebida e determinada a estrutura.

Nesse sentido, Rebello¹ diz-nos:

“Não é o calculo que concebe a forma, mas sim o esforço de ideação da mente humana. O cálculo existe para comprovar e corrigir o que se intuiu.” (Rebello, 2000:27).

E, lembrando novamente Rebello²:

“Uma coisa é conceber a forma da estrutura; outra coisa é dimensioná-la, para que seja capaz de suportar as condições de trabalho, às quais estará submetida. Conceber é compreender; entender é ser capaz de explicar. A conceção da estrutura é anterior ao seu dimensionamento, ou seja, à sua

¹ Cf. Rebello 2000:27.

² Cf. Rebello 2000:26

quantificação. É uma atitude ao mesmo tempo metódica e intuitiva”. (Rebello 200:26)

Neste campo, existe no âmbito da presente tese uma partilha ideológica com Rebello. O *funcionamento estrutural* é distinto e diverso do cálculo e do dimensionamento.

O cálculo e o dimensionamento por si só não produzem espaço nem qualificam espacial e formalmente a peça arquitetónica. Isto não é, contudo, sinónimo de que o arquiteto deva ignorar a estrutura e o seu funcionamento; este é basilar para a conceção estrutural, a qual decorre da conceção espacial.

Só assim e com efeito, a Arquitetura é, e *será sempre*, diferente de Engenharia Civil.

A Engenharia pressupõe, aliás, impõe, o cálculo e o dimensionamento. Já a Arquitetura não trata do cálculo, nem do dimensionamento. O Cálculo e o dimensionamento carregam consigo o risco de gerar um conflito entre a conceção e o cálculo, podendo reduzir e castrar a liberdade e criatividade individual do arquiteto.

Fica assim claro que conceber a estrutura não implica o seu cálculo, facto pelo qual o seu ensino é mitigado na formação e atividade do Arquiteto em Portugal e na generalidade dos países, pois estas tarefas de *Projeto* não integram os atos próprios, do exercício profissional do arquiteto, enquanto produtor de Arquitetura.

A compreensão fenomenológica da forma, enquanto estrutura, possibilita a sua manipulação, de modo não só a aumentar a sua eficiência estrutural, mas, igualmente a permitir melhor tirar partido do seu potencial formal expressivo, entenda-se, *o valor plástico que a estrutura visível carrega e possui*.

O sistema estrutural permite gerir o “*conflito de direções*”³, que se estabelecem entre o carácter vertical da gravidade, i.e., o peso próprio da matéria que constitui a peça arquitetónica e o carácter horizontal do espaço criado pelo Homem, neste caso, o *vão*, que resulta do modo como a forma define o espaço.

O *conhecimento* que informa a interação entre a matéria, a gravidade e o espaço (criando vão) permite gerir a geometria do material ao longo do elemento estrutural, de modo a que o trabalho interno produzido pela estrutura atómica seja mais eficiente, num

³ Cf. Engel, 1997: preâmbulo

processo que designamos por *funcionamento estrutural* ou, “o caminhar da força” (Morais, 1997).

O conceito e a respetiva fenomenologia associada ao *caminho da força* está intimamente ligado ao conceito geométrico da direção. Conceber a forma estrutural é gerir e manipular a geometria da forma, é saber desenhar com a direção das forças. Deve pois concluir-se que, o caminho da força e a forma são necessariamente interdependentes.

A forma estrutural é eficiente e esbelta, resulta da articulação da direção do caminho da força com a direção do eixo da forma. Gerar a forma com princípios estruturais eficientes, é como deverá definir-se, em nossa opinião, a *Morfogénese Estrutural*.

A adoção deste método de desenho permite alcançar uma grande fiabilidade estrutural. Sendo mais eficiente, naturalmente produz formas e geometrias mais esbeltas, sendo a esbelteza um critério estético e ético da forma, comumente aceite na Arquitetura. Ou seja, as formas esbeltas carregam não só beleza, como permitem e potenciam o criar de espaços com vão maior; considerando-se este um outro objetivo da Arquitetura, através do qual se visa potenciar a *eficiência do funcionamento estrutural*.

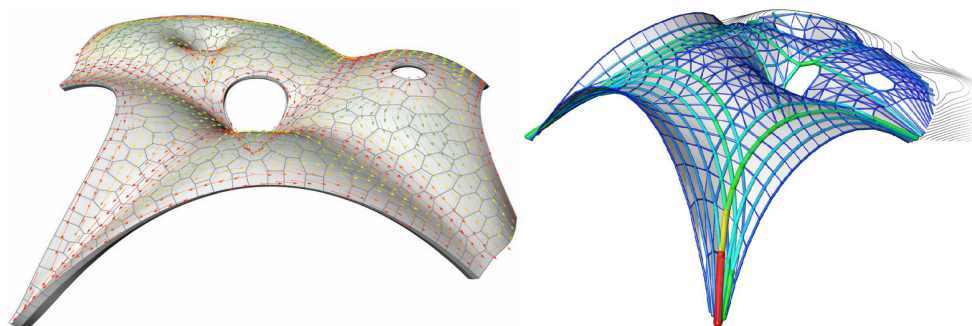


Figura 1.1 – Fluxo de forças ao longo da forma estrutural
 (“Block Research Group”, n.d.)

A conceção espacial vincula o arquiteto a uma determinada solução para o sistema estrutural e a certos instrumentos tecnológicos. Tal significa que da definição de espaço, emerge por escolha do Arquiteto, uma solução tipológica de estrutura, que formaliza e viabiliza esse espaço ideado, i.e., que *permite a sua criação*.

Esta consciência induz uma estratégia projetual ao arquiteto, contribuindo assim para a definição da respetiva metodologia, a qual deste modo, potencia a eficiência e a expressão plástica da *obra*. O sistema estrutural e construtivo da obra arquitetónica deve pois ser concebido de modo uno, em simultâneo, com a forma arquitetónica.

Qualquer exercício de composição espacial, encontra resposta estrutural, num conjunto restrito de tipologias estruturais básicas, com capacidade para viabilizar a respetiva forma arquitetónica, requerida pela ideação do arquétipo do projetista – o *Arquiteto*.

Deste modo, o sistema estrutural emerge deste processo compositivo. Conceber o espaço é conceber a forma enquanto *manifestação material da geometria*. A forma define, consequentemente, o sistema estrutural que viabiliza a trilogia: espaço – forma – material. Conclui-se, assim, que a conceção do sistema estrutural é algo tão precoce como a definição do espaço, e que decorre de um processo interativo, e *iterativo*, entre o espaço e a forma.

Esta abordagem transversal, aqui denominada de *Projeto Integrado*, realizada em simultâneo no plano metodológico e cognitivo, embora meramente qualitativa, é determinante para a eficiência estrutural e para a expressão plástica. A geometria do elemento estrutural também carrega, por si só, valor plástico, o que naturalmente contribui, e determina, a expressão formal da *obra* arquitetónica produzida. (Morais, 2016: 323)

A utilização otimizada das formas com geometrias curvas, em especial as de dupla curvatura, no âmbito da arquitetura, implica uma abordagem capaz de integrar todas as dimensões decorrentes da prática da arquitetura, isto é, a forma arquitetónica não vale por si mesma, ela é antes o resultado da opção por uma expressão espacial, *tecnológica*, funcional, *estrutural*, estética e cultural.

A Arquitetura encerra em si várias dimensões, não se restringindo unicamente à sua dimensão compositiva e espacial. A dimensão concetual deve ser articulada com o processo tectónico. Ambos não são autónomos, embora não poucas vezes aquela seja ignorada na prática do Projeto.

A visão integrada de *projeto e construção*, implica um exercício de síntese baseado num conhecimento multidisciplinar, capaz de integrar, por um lado, os processos de modelação geométrica, fenomenologia e funcionamento estrutural, i.e., o referido

caminhar da força, e, por outro, o domínio dos sistemas construtivos disponíveis e adequados.

Assegurada esta interligação, o produto da mesma irá permitir posteriormente integrar nesta dinâmica, os processos de produção em fábrica, articulando os vários ciclos e processos de um modo dialético, permitindo deste modo equacionar e interrelacionar a expressão formal, o funcionamento estrutural e o processo de fabricação e construção.

Deste modo, a articulação da conceção e da construção permite não só otimizar o processo de construção, como também confere ainda uma maior solidez concetual à peça arquitetónica, quer no aspeto compositivo, quer na dimensão tecnológica.

As ferramentas digitais e os processos que delas emanam, suportam com naturalidade, esta abordagem metodológica. Tal implica contudo a adoção de um novo suporte teórico capaz de enquadrar as potencialidades destas ferramentas, dentro dos desígnios da prática do Projeto. As alterações a nível da representação, análise e fabricação, trazem consigo mudanças, que têm que ser acolhidas na formação e na prática do Arquiteto.

Esta abordagem passa por uma metodologia de projeto capaz de contemplar e dominar a dimensão tecnológica no processo da conceção. E são as ferramentas digitais, como se referiu, que potenciam, alavancam e conseqüentemente, consubstanciam o respetivo suporte operativo, não só na definição da forma e do seu funcionamento estrutural, como, também, agregando a personalização e a industrialização ao processo produtivo (personalização em série), através do denominado “*contínuo digital*” corporizado pelo - CAD/CAE/CAM.⁴

Os processos digitais integrados alteram, melhor já alteraram e, futuramente, alterarão ainda mais, o paradigma metodológico e cognitivo do Arquiteto, tornando-o global, integrando e inter-relacionando o Projeto, desde a conceção à produção.

O projeto da *peça* arquitetónica deve, no seu contexto ideativo, englobar e integrar todo o ciclo relativo à sua existência desde a sua fase embrionária, ligando a conceção ao final da construção da peça.

O Projeto deve ainda atender e integrar na sua conceção, a utilização e desempenho da peça arquitetónica durante a sua vida útil (térmico, acústico, lumínico, estrutural,

⁴ Conceito de conceção / fabricação enunciada por Branko por Kolarevic em 2000 com o título de “Digital Architectures”.

etc.), no que pode ser visto como toda *uma outra dimensão da Arquitetura*. Esta etapa analítica e performativa, permite assim antecipar os níveis de desempenho da peça arquitetónica na fase de projeto – CAE (Computer Aided Engineering).

A nova abordagem e metodologia a implementar, na academia e na profissão, parecem-nos que imporiam a obrigatoriedade de o Projeto sintetizar de modo transversal e simultâneo todas as fases intervenientes, como a forma e a funcionamento estruturais, os sistemas construtivos e respetivos materiais, processos construtivos a adotar na construção e produção, bem como os aspetos relacionados com a utilização e manutenção da peça arquitetónica.

O Projeto deve assumir deste modo um carácter integrado e global, sendo a articulação destas tarefas, sempre, propriedade do *conhecimento* e da *criatividade* do Arquiteto.

A apologia de uma visão holística como suporte da prática da Arquitetura pretende ser um dos pressupostos e contributos emergentes desta tese, para a abordagem das geometrias curvas na arquitetura. E seguramente, a metodologia de *Projeto Integrado e Global* aqui defendida para as *superfícies curvas* é também passível de ser disseminada e expandida para outros universos formais, designadamente os mais convencionais, como os lineares.

Na base desta abordagem está a consciência do papel relevante que os aspetos tecnológicos, antigos e/ou atuais devem necessariamente ter na conceção e definição da arquitetura em cada época.

Como a prática conceptual restrita, se esgota frequentemente no processo compositivo e formal do espaço, não poucas vezes se limitando a articular elementos como, tipo, arquétipo, tipologia, módulo e ordem, importa, pois, desenvolver e adotar metodologias de projeto que possam ir para além da referida dimensão compositiva, de modo a que o ato de conceber arquitetura acolha e passe a integrar a componente tecnológica, aliando a dimensão criativa à (opção concreta pela) dimensão material.

Na abordagem, defendida neste trabalho, porém, não se trata de procurar dar a primazia ou sequer exaltar a dimensão tecnológica no processo de ideação do Projeto. Esta conceção será sempre merecedora de um total repúdio, já que a divinização da tecnologia da/na arquitetura não é de todo o foco da investigação desenvolvida. O que se pretende referir é que o campo tecnológico tem por missão exponenciar a dimensão compositiva e espacial da Arquitetura.

A tecnologia é deste modo, antes elemento instrumental para a Arquitetura, pois que a forma enquanto resultado do processo compositivo, não pode ser realizada sem um conhecimento sobre a sua possível exequibilidade tecnológica (i.e., se é possível, ou não, fazê-la e como fazê-la). Este terá sempre de ser necessariamente aceite como princípio basilar.

O caminho passa por retirar da *tecnologia* o conhecimento adequado e apropriado à criação arquitetónica; só um conhecimento adequado e ajustado, enformará a produção de conceitos e doutrina, no campo tecnológico, próprios e específicos do acervo da Arquitetura.

É neste âmbito, que Edson Mahfuz destaca a passagem do “*todo conceptual*” para o “*todo construído*”⁵. Este processo faz emergir e considerar a dimensão tecnológica da arquitetura no processo de conceção. Naturalmente, a assunção da tecnologia adequada confere solidez concetual ao *Projeto*, exponenciando inclusive a expressão formal do objeto arquitectónico.

O substrato teórico definido por Mahfuz, no âmbito da teoria de projeto, encontra nas ferramentas digitais um quadro de aplicação, configurando uma metodologia passível de ser aplicada quer à prática quer à aprendizagem do arquiteto.

Com efeito, se é verdade que as ferramentas generativas abrem novos horizontes granjeando liberdade criativa na busca e desenvolvimento de novas gramáticas formais, é infelizmente certo também que este desenvolvimento, na manipulação da forma através de processos digitais, não é ainda capazmente acompanhado ao nível dos processos de fabricação.

A fabricação digital revela persistentemente alguma ineficiência e onerosidade, nomeadamente na materialização de superfícies curvas e de dupla curvatura, e dos seus respetivos sistemas construtivos. Lamentavelmente os meios digitais de fabricação ainda não atingiu um estágio de desenvolvimento em que se assumam como uma alternativa cabal a outros processos de fabricação, como por exemplo já se verifica na indústria, automóvel, aeronáutica e naval.

Branko Kolarevic refletindo sobre a relação entre o projeto e a fabricação digital, chama a atenção para a potencialidade da integração digital CAD/CAE/CAM, gerando aquilo a

⁵ Metodologia proposta por Edson Mahfuz na qual o processo conceptual é suportado pela passagem do plano conceptual – abstrato, para o plano concreto – material.

que chama o “*contínuo digital*”. A sua investigação destaca a questão instrumental do fabrico digital através de técnicas aditivas, subtrativas e formativas.

Obviamente, que o novo paradigma operativo exige, como se disse, da parte do Arquiteto uma visão integrada e global do ato de projetar. Este propósito e necessidade, exigem um novo paradigma cognitivo, uma metodologia de Projeto ajustada, bem como um novo espaço doutrinário próprio e específico da conceção Arquitetónica.

E, por isso, procurando antecipar o futuro, Kolarevic postula:

“A era digital tem reconfigurado radicalmente a relação entre a conceção e a produção, criando uma ligação direta entre o que pode ser concebido e construído. Os projetos de construção de hoje não são apenas nascidos digitalmente, eles também são realizados digitalmente através de tecnologias de fabricação “file-to-factory”; tratam-se de processos de controlo numérico computado (CNC).” (Kolarevic, 2003:46)

Contudo, para além destes aspetos teóricos, estruturantes do âmbito do objeto tratado na presente tese, torna-se do mesmo modo necessário ter em conta e dominar as exigências (também teóricas, mas igualmente) fenomenológicas que decorrem da introdução do elemento material e da sua interação com a gravidade.

É desta abordagem que se parte no subcapítulo seguinte para a análise da importância que a passagem da geometria para a forma impõe ao processo ideativo do arquiteto, no âmbito da materialização do artefacto arquitetónico. É o que Moraes chama:

1.2 A gravítica da forma

Para este Autor, projetar significa criar, conceber, dar expressão formal e material a uma ideia. O ato de *conceber* em arquitetura resulta de um processo dialético, suportado pela conhecida trilogia vitruviana (“*Firmitas*”, “*Utilitas*”, “*Venustas*”).

Conceber implica assim definir a dimensão tectónica da peça arquitetónica, isto é, *como* materializar a ideia. Materializar é conferir *vida* à superfície; permitir que esta exista. Materializar significa e pressupõe espessura. Esta fornece expressão visual e existência

à geometria, que, por si só, é uma entidade operativa abstrata, definida por segmentos de reta e planos.

O ato de *Projeto*, em arquitetura, consubstancia-se na definição do espaço, definição essa que, enquanto forma arquitetónica, escolhe e determina a sua materialidade. Estas opções definem o funcionamento estrutural, determinam a plasticidade e o desempenho da *obra arquitetónica* no decurso da sua vida útil.

O ato de projetar tem como base operativa o conhecimento e a criatividade. Projetar é uma busca do desenvolvimento e da criação de novas soluções; envolve o domínio de um espectro abrangente de áreas de conhecimento, entre eles o domínio do saber fazer.

O *Projeto* é assim um ato de síntese, que resulta das várias áreas disciplinares que sustentam a Arquitetura nas suas diversas *dimensões: plásticas, construtivas, tectónicas, simbólicas e até de memória*. Para além destes “alicerces” a *Arquitetura*, em si, comporta ainda vários domínios, entre os quais se contarão, a estática e o *sistema estrutural* e construtivo. Estes são por sua intrínsecos à peça arquitetónica, e configuram-se como seu património identitário enquanto objeto.

São diversas as *dimensões da Arquitetura*. A criação e definição da *forma* da estrutura é ainda domínio do Arquiteto, sobretudo, a escolha das tipologias das formas estruturais básicas, embora, muitas vezes, este, não tenha consciência de que a determinou.

As tipologias das formas estruturais básicas emergem e ao mesmo tempo conformam o traçado compositivo escolhido pelo Arquiteto. O desconhecimento do contributo determinante desta gramática (tipologias e sistemas estruturais) para a definição e conceção do sistema estrutural, limita a ação criativa e impede o arquiteto de alcançar um nível mais elevado na fiabilidade e expressividade da sua criação, retirando solidez concetual ao projeto.

Atente-se deste modo, no processo de criação da peça arquitetónica. Nele, o arquiteto e o engenheiro civil têm âmbitos e lógicas de atuação distintas, mas ambos intervêm na sua elaboração. (Morais, 2016: 330)

O arquiteto concebe a *forma* arquitetónica, logo, e por inerência configura a *forma* da *estrutura* que emerge e possibilita a existência material da forma arquitetónica; esta é acolhida na volumetria da forma global do edifício.

Visível ou oculta, a forma da estrutura tem sempre que existir para viabilizar a forma arquitetónica, e naturalmente aquela está contida na volumetria global do edifício. Integra sempre a forma arquitetónica; está pois encapsulada nela.

O arquiteto até pode não ter consciência da sua ação e das consequências que tal acarreta, mas, consciente ou inconscientemente, subjacente ao partido formal definido pelo arquiteto, para a peça arquitetónica, existe uma estrutura que a suporta e que numa certa dimensão é a própria peça, pede a própria peça ou é por ela pedida; a sua caracterização tectónica agrega forma e espessura, isto é, forma e material, são elementos determinantes para impor o funcionamento estrutural específico da peça.

Vejamos, a criação formal do edifício: esta é impossível sem definir previamente qual, ou quais, as formas das tipologias estruturais básicas a que o arquiteto vai recorrer para materializar e realizar a obra. Pensar o contrário é um logro e uma falácia. (Moraes, 2016: 350)

Quando o arquiteto começa a esquiçar, tem em mente o programa funcional a que procura dar resposta, e com a sua criatividade gera o volume que resulta do espaço e da plasticidade por ele desejadas, i.e., gera a *composição sintetizadora*. Porém, ainda que de modo inconsciente, e em simultâneo está a determinar a, ou as, tipologias estruturais básicas; aquela, ou aquelas, que lhe possibilitam a existência da forma esquiçada.

Pensar que existem duas entidades distintas e autónomas, de modo separado no processo de conceção, isto é, a criação da forma do edifício e a da forma do sistema estrutural, é irreal. Não só é erróneo pensar tal, como acarreta graves consequências ao processo construtivo e produtivo.

Com efeito, a prática da Arquitetura como base nesta metodologia de projeto não só conduz a disfunções e desconformidades que prejudicam a economia e o potencial criativo do arquiteto, como e, sobretudo, afetam e limitam o funcionamento estrutural e o potencial plástico da peça arquitetónica, quando venham a ser tidas em conta. Esta metodologia não estimula uma gestão mental integrada no ato de projetar, cerceando o desenvolvimento de um *pensamento projetual* integrado, transversal e concetualmente sólido.

Ao determinar o partido formal, este vai obrigar o arquiteto a uma escolha apropriada da, ou das, tipologias das formais estruturais básicas. A escolha está vinculada e não é aleatória; apresenta condicionantes e interligações. As tipologias estruturais básicas,

formam uma gramática com as suas características formais e funcionais, o que exige conhecimento e estudo atento por parte do arquiteto, para que as domine e utilize apropriadamente, como modo de expressão, e não como um constrangimento adicional à sua liberdade criadora.

É um logro pensar que o arquiteto não necessita de conhecer o vocabulário, a morfologia e sintaxe, ou seja, a gramática estrutural das tipologias estruturais básicas disponíveis. Conceptualmente, este léxico corresponde às formas estruturais mais simples, em termos comportamentais e classificativos (viga, laje, quadro, pilar, coluna, asna, catenária, arco, tirante, escora, abóbada, cúpula, membrana, estrutura plissada, tubular, etc.).

Falta, porém, racionalidade à visão instalada, de que o trabalho do arquiteto se resume à conceção do espaço e de uma geometria que o contenha, conceito englobante que poderemos denominar como *envelope arquitetónico*. Nada de mais errado; no trabalho do arquiteto, a geometria pertence ainda ao domínio da abstração, não tem em conta a matéria e a gravidade. É necessário que a prática e a formação do arquiteto tenham presentes esta realidade material. A geometria sozinha não é suficiente, não nos materializa nenhum edifício. Não há em Arquitetura, geometria ou traço *sem espessura*.

A espessura, ao definir a terceira dimensão da superfície, passa a ter a gravidade associada, ou seja, implica o conceito de *força*. Considerar a existência da *força* implica desenvolver o conceito do *caminho da força*, i.e., do funcionamento estrutural. O caminho da força expressa a *forma* da estrutura. A Forma tem uma espessura associada. Quem concebe e determina o *caminho da força*, a forma da estrutura, é o arquiteto. Quem determina a espessura, mediante o cálculo estrutural, é o engenheiro civil.

E, assim, Moraes, diz-nos:

“A abordagem analítica das estruturas, remete e sujeita a criação do vão unicamente à capacidade do material resistir à tensão instalada; este paradigma do ensino de estruturas prende-se e atenta somente à variável do cálculo, esquecendo a forma. A manipulação da forma na busca de equilíbrios diretos, permite abarcar um outro paradigma estrutural, no qual o vão decorre da forma e do idear do caminho da força a percorrer a forma

estrutural, até alcançar a fundação, potenciando-se assim a expressão formal do espaço, utilizando não só menos material, mas, sobretudo, retirando valor estético da forma estrutural”. (Morais, 2016: 70)

O ato de desenhar ou modelar em ambiente digital não reproduz o comportamento do material e da gravidade. Esta condicionante é, antes de mais, um ato mental que o arquiteto tem de desenvolver, no sentido de dotar, as peças que concebe, de um adequado funcionamento estrutural.

Esta atitude mental permite ao arquiteto atingir e gerir a forma nas suas múltiplas dimensões (e.g., espacial, funcional, cultural, estrutural, construtiva, simbólica, estética, etc.) alcançando níveis de excelência e de consistência projetual, que de outro modo não conseguiria.

Senão, vejamos.

O ato criativo que consubstancia o exercício de projeto não resulta de uma abstração completa; ele tem de levar em conta um contexto físico e material. O arquiteto deve ter perfeita consciência dessa situação. Quando faz um traço, ele tem de saber das implicações físicas e tecnológicas dessa representação. Todos temos a perfeita consciência que o *esquício* de uma forma no papel é uma representação de uma realidade, que se pretende edificar e define um processo alográfico, onde o desenho medeia entre a ideia e o objeto e quasi-holográfico, no sentido em que permite representar essa realidade bidimensional, como sendo tridimensional e, logo, *quasi-real*). Ora essa realidade edificada resulta(rá) numa manifestação material e tectónica.

A materialização do traço implica uma caracterização física, logo, *espessura e técnica*. Toda a realidade construtiva significa material, espessura e tecnologia. A *forma* tem espessura, logo, tem matéria, a qual está sujeita à ação da gravidade, do que se concluirá assim com facilidade, que todo o traço projetado tem efetivamente gravidade associada, com as implicações tecnológicas inerentes à sua viabilização. E o facto de estar sujeito à ação da gravidade, necessariamente consubstancia e pressupõe um concomitante, inerente e determinante funcionamento estrutural.

Quando o arquiteto desenha um traço, está a representar uma forma *material* com espessura, que tem assim *peso*, devido à gravidade, a que associamos o conceito *força*

que decorre do seu peso próprio. A *força* desencadeia o *funcionamento* estrutural da forma, que esta, forçosamente, tem de assumir para desempenhar a sua função. Não há *forma* que não seja também *estrutura*, com o seu funcionamento estrutural específico que decorre da disposição do material no espaço.

A forma acarreta funcionamento estrutural. Sempre que o arquiteto desenha uma forma está a lidar com o fenómeno estrutural. Por muito que a comunidade profissional e académica ignore, evite refletir, falar e escrever sobre este tema, a fenomenologia estrutural decorre da forma, sendo esta o elemento contendor e definidor do espaço.

Ergo, não há *forma* sem função estrutural.

Todos os arquitetos sabem que qualquer material tem que possuir capacidade para transportar o seu próprio peso. Qualquer que seja o traço, enquanto representação material, este adquire, em função do que representa, um funcionamento estrutural, com as suas regras e limitações. Este contexto físico condiciona toda a realidade projetual no planeta Terra e não existe fuga possível à gravidade, visto que esta determina um funcionamento estrutural específico para cada tipologia, e é este o ethos da fenomenologia estrutural.

Perante esta fenomenologia, o arquiteto não pode desligar-se desta realidade e assumir na sua prática de projeto, que qualquer forma é viável, apenas por que se manifesta através da representação. Subentender que qualquer geometria é possível de implementar, sendo as suas implicações estruturais resolvidas *à posteriori*, nada mais é do que uma atitude projetual que não ultrapassa um nível simplista e irracional. Trata-se de um processo de negação que fragiliza o processo concetual com fortes impactos no processo de conceção.

Concluindo, não há forma sem gravidade nem processo tecnológico. E é esta a realidade gravítica e construtiva de qualquer *forma* arquitetónica. Entender este fenómeno dialético e iterativo, é não só determinante para as formas curvas e de dupla curvatura como para a prática e a aprendizagem da arquitetura, enquanto Arte (e enquanto arte do) Real.

São estes os equívocos, que se pretende enfrentar com a metodologia de projeto, proposta, capaz de contemplar a dimensão técnica da arquitetura na sua fase de conceção e tendo como base um quadro instrumental suportado por meios digitais, fortalecendo a prática e a aprendizagem de projeto.

O entendimento do referido conceito de *envelope arquitetónico* como uma superfície geométrica, na qual existam apenas linhas e planos sem espessura, limita a compreensão da fenomenologia estrutural. Para compreender o *sistema estrutural* temos que ir além da geometria e, daí a necessidade de considerar o estudo e análise da forma estrutural. Esta possui espessura e, por conseguinte, adquire a referida natureza gravítica.

O estudo de um corpo, e do seu funcionamento estrutural, não se limita a conhecer a sua geometria, implica considerar o seu funcionamento estrutural conforme decorra da gravidade, i.e., a *forma estrutural*, a qual integra e considera o material e a espessura, que denominamos de “a *gravítica da forma*”. Este é o erro metodológico que frequentemente separa a criação da forma arquitetónica e a forma estrutural.

A forma tem espessura, logo, retirar o carácter gravítico da *forma*, isto é, assumir que esta não tem função estrutural, é irreal e revela um total desconhecimento do fenómeno da gravidade e, consequentemente, daquilo que é a génese da Arquitetura.

Tudo aquilo que tem massa, corpo ou elemento construtivo, estrutural ou não, tem que desempenhar uma função estrutural, que resulta da ação gravítica, pois tem, pelo menos, de assegurar o transporte do seu peso próprio até ao elemento estrutural mais próximo, seja este uma viga, uma asna, uma laje, um pilar, ou qualquer outro elemento estrutural.

Como exemplo desta realidade, temos a tinta de uma dada parede ou teto, que embora possua uma espessura diminuta, quase inexistente, logo, próxima do conceito geométrico de plano, existe como material, tem massa e, por consequência, tem peso próprio, ainda que de valor reduzidíssimo, pelo que a tinta tem, assim, que ser capaz de transportar o seu próprio peso até ao elemento que lhe dá suporte. No caso de não conseguir desempenhar esta função, transportar o seu peso próprio, dá-se o seu desprendimento, leia-se, a correspondente rutura da tinta.

O arquiteto sempre que esboça uma forma, está a manipular a gravítica dessa forma estrutural, mesmo que de modo inconsciente. O arquiteto deve questionar-se em contínuo, das possibilidades gravíticas da forma, que está a criar; e fá-lo, mesmo que dela não tenha consciência plena, pelo que tomar consciência destes fenómenos tem implicações no processo conceptual e cognitivo do arquiteto.

Assumir a separação da geometria compositiva e da forma estrutural, ao nível da metodologia de projeto, conduz o arquiteto a soluções que não emanam da lógica da do conceito, que não traduzem a verdade material e tectónica das coisas, implicando soluções mais complexas do ponto de vista construtivo e, portanto, menos racionais.

Tenha-se sobre aspeto, como exemplo, a obra de Eládio Dieste e Frank Gehry, em que ambos utilizam superfícies de dupla curvatura.



Figura 1.2 – Construção do museu Guggenheim, Bilbao, 1997, arquiteto Frank Gehry
(“Aço na Construção: Museu Guggenheim”, n.d.)

Um destes casos é o do museu Guggenheim Bilbao, projetado por Frank Gehry. A qui, a especulação formal e imagética foi determinante no seu processo concetual, pautado pelo valor estético e simbólico. Contudo, ignorando as restantes dimensões da Arquitetura, e salvo melhor opinião não foi capaz durante a sua conceção de antever e racionalizar o funcionamento estrutural e articulá-lo com o processo construtivo. Por esse motivo, não estabeleceu uma relação entre a forma arquitectónica, a forma estrutural e o processo construtivo, pelo que acabou criando uma forma síntese, aqui denominada forma síntese ou tecno-estrutural⁶.

Em consequência desta abordagem projetual, a “pele” que define esta peça arquitetónica é suportada por uma estrutura de aço independente e escondida. Esta disfuncionalidade entre o processo morfogénico, os modelos estruturais e as soluções tectónicas, é geradora de uma complexidade por vezes caótica (cfr. Fig. 1.2) com sérias implicações no processo construtivo. As referidas inconsistências e falta de

⁶ Conceito desenvolvido nesta tese que abarca a geração da forma com princípios estruturais - morfogénese estrutural e a tecnologia construtiva que a viabiliza

racionalidade estrutural das opções tectónicas adotadas, geraram um edifício que necessitou de um enfrentamento frequente entre a forma e a estrutura.

Apesar da pele do edifício ser feita de um material de alta resistência mecânica, como é o titânio, as suas características não foram aproveitadas no funcionamento estrutural respetivo e, deste modo, poderá dizer-se que não participam na globalidade do *caminho da força*. A separação entre estrutura e o revestimento ocasiona assim, face a este entendimento, um conjunto de inconsistências, inclusive, parece-nos, no plano da estética e da ética da forma.

Este tipo de projeto necessita e envolve o *conhecimento* de vários parceiros (presentes nos denominados projetos de especialidade), que muitas vezes atuam sem um desígnio projetual comum, limitando-se a responder às necessidades técnicas do projeto, mas de modo desarticulado.

Desta desarticulação resulta frequentemente, uma quebra de identidade, na interação dos vários componentes, que constituem o processo de conceção arquitetónica, inviabilizando a síntese, que sempre caracterizou o universo disciplinar da Arquitetura



Figura 1.3 – Ginásio Don Bosco, Montevideo, Uruguai, 1984, Eladio Diest
("Material Tour de Force: The work of Eladio Dieste", 2014)

O contraponto conceptual à obra de Gehry é-nos dado por Eládio Diest. As duas obras revelam processos metodológicos antagónicos, em que ambos abordam e lidam com a mesmo léxico formal, logo o mesmo funcionamento estrutural, embora aqui com uma abordagem aos materiais e às tecnológicas radicalmente diferente.

Dieste tem uma abordagem à forma que decorre do material e das suas potencialidades estruturais e plásticas, em que a forma decorre das propriedades do material e este é explorado na sua íntegra. Os seus princípios de projeto são na nossa opinião, mais

racionais e decorrem do próprio contexto tecnológico, integrando no projeto a conceção e a construção. A forma arquitetónica e a forma estrutural, em Dieste, são resultado de um processo dialético, que as torna unas, integradas, evidenciando desta forma uma notável consistência conceptual e tectónica.

Estes exemplos põem em evidência uma realidade: o processo metodológico é fiador da consistência da obra. Esta consistência é o aspeto determinante, responsável pela produção da arquitetura, baseada não só na “*verdade*”, que incorpora e potencia as diferentes dimensões da arquitetura, mas que determina igualmente a possibilidade de existência física e material do artefacto arquitetónico (pelo menos no plano da eficiência estrutural) que catalisa e aporta valor plástico à forma estrutural.

Esta abordagem contrasta com a atitude, muito vulgar, que se vê na contingência de esconder a estrutura, não sendo, assim, capaz de tirar proveito da potencialidade estética e formal dos materiais e das formas utilizadas, sendo que o sistema estrutural escapa assim aos princípios conformadores do *Projeto*.

O projeto final resultante ultrapassa e, por vezes, afasta-se da *ideia* do *projeto* inicial, sendo muito mais consequência das opções que o responsável pela estrutura vier a desenvolver e implementar, do que decorrentes da ideia espacial e formal inicial. Em regra, estas soluções são algo menos racionais, pois não emanam da lógica formal; não correspondem ao desejo inicial do arquiteto e, assim a sua ideia inicial sai desvirtuada.

No ato criativo, o traço do arquiteto, resulta do seu pensamento. O arquiteto tem de, mesmo que de modo incipiente, e até por vezes empírico, de fazer a fusão da forma com o *traço*, por necessitar de expressar e possibilitar a existência gravítica dessas formas (Marquardt, n.d). A solução desejável resulta da implementação da metodologia do *projeto integrado*, onde a ideação aborda em simultâneo a forma arquitetónica e a gravítica da *forma estrutural*.

A prática de projeto adotada em Portugal, resulta de um processo metodológico que mitiga a importância da técnica. Em regra, o arquiteto, por ausência de reflexão específica sobre a particularidade desta temática, por ter menor familiaridade, por lhe atribuir menor valor ponderativo, por razões de celeridade, por mero expediente ou, simplesmente, por cautela, não elabora o projeto de modo uno e síncrono, esquivando-se à integração da forma estrutural e do processo construtivo na solução global do edifício.

Ocorrem assim disfunções, e a *Arquitetura* consequentemente sai diminuída. Nesta metodologia de projeto, mais facilmente se perderá o valor estético e ético da forma estrutural.

1.3. Contextualização do *problema*

1.3.1 Problema geral

Este subcapítulo destina-se a delimitar e caracterizar a problemática que induz à realização desta tese. A especificidade das formas curvas e de dupla curvatura implica uma abordagem sólida, capaz de abarcar as diferentes etapas da arquitetura. Esta perspetiva choca frontalmente com uma *praxis metodológica* de Projeto que ignora ou relega a tecnologia para fases mais tardias do exercício do projeto. Ora tal necessariamente induz fragilidades ao ato ideativo, podendo facilmente gerar desconformidades construtivas relativamente ao princípio ideativo do projeto.

A caracterização deste subcapítulo, denominado *Problema*, é o determinante fundamental para a proposta de fazer emergir de um novo paradigma metodológico de *Projeto*, capaz de abordar com solidez e de modo consequente esta problemática (conceção, construção), retirando partido das ferramentas digitais que, entretanto, evoluíram e se disseminaram, tendo hoje uma aplicação generalizada e incontornável na arquitetura.

O processo operativo conceptualizado por Kolarevic como “*contínuo digital*” e que se formaliza num conjunto de ferramentas digitais, permite alavancar e potenciar o desenvolvimento desta nova *metodologia de projeto*. Pugnar por uma nova abrangência da metodologia, considerando e integrando as diferentes componentes do projeto no ato ideativo do arquiteto, pretende ser uma das contribuições, objeto da presente dissertação.

Como de forma aproximativa, supra, já se começou por referir, as superfícies de dupla curvatura apresentam um elevado potencial espacial e plástico, a par de uma maior eficiência estrutural, quando comparadas com outras formas geométricas. Não obstante estas características, as superfícies curvas são ainda hoje em dia pouco utilizadas.

A complexidade e especificidade das superfícies curvas implicam hoje o desenvolvimento de uma metodologia capaz de responder às solicitações próprias deste contexto formal; uma vez que a metodologia por norma adotada pelos projetistas exibe pouca ou nenhuma capacidade de resposta conceptual pronta e rápida a esta problemática. Poder-se-á dizer que é a própria opção pela metodologia que acarreta a pouca utilização destas superfícies. Esta situação verifica-se inclusive no corpo de alunos onde por norma, estes não “arriscam” caminhos que envolvam a superfície curva, por receio e/ou desconhecimento.

A atitude de ignorar o mundo das superfícies curvas é um problema para o campo disciplinar e reflexivo da Arquitetura. Constitui-se numa área menos percorrida, ou percorrida com maior cautela que importa reverter, densificar e preencher. A diversidade formal e espacial é algo a ser valorizado; a diversidade, também na Arquitetura é um valor fundamental que importa cultivar, fomentar, acarinhar e preservar.

A Arquitetura valoriza-se e potencia-se com a multiplicidade de formas e linguagens a que recorre. Este tema integra o *Problema*, o qual se pretende sistematizar e definir neste subcapítulo, e que emerge da utilização das superfícies curvas, designadamente as de dupla curvatura, pois esta tipologia formal está a cair em desuso, empobrecendo assim a *diversidade formal* da Arquitetura contemporânea.

Um outro aspeto de contextualização do *Problema* respeita à variável espessura, aliás perfunctoriamente abordado no subcapítulo anterior. Temos, no problema geral, uma questão hermenêutica associada às usuais denominações de geometria e forma utilizadas no âmbito do Projeto e da *Metodologia de Projeto*. O conceito matemático *geometria*, embora de utilização vulgar no vocabulário do arquiteto, expressa, no entanto, uma configuração desprovida de densidade material, ou seja, sem espessura e, simultaneamente, infinita (linha, plano). O próprio étimo *forma*, utilizado correntemente pelo arquiteto, está descontextualizado quanto à dimensão tectónica do material, ou seja, o seu significado, em regra, não alberga as variáveis, quer de espessura, quer material.

Esta tese procura contribuir de forma que se pretende incisiva, ao desenvolver e propor uma nova metodologia de projeto, para superar este *Problema*, visando colmatar a limitação metodológica da atual *praxis* de *Projeto* em Arquitetura, no âmbito das superfícies curvas e de dupla curvatura.

O conceito “estrutura” usualmente utilizado pelo Arquiteto tem uma significação redutora e restrita que importa clarificar, refundando o conceito, de modo a ajustá-lo ao contexto da atuação e ação da Arquitetura. Deste modo, importa sobremaneira desenvolver doutrina específica no campo das *formas estruturais*, propriedade intelectual e científica da Arquitetura.

Para o Arquiteto, e por conseguinte, para a Arquitetura, “estrutura” significa *forma agregada de espessura*. Para a Engenharia, estrutura significa *cálculo e dimensionamento*. Embora ambas as profissões utilizem o mesmo vocábulo, este tem referentes e densidades teóricas diferentes (embora parcialmente confluentes) para cada uma das profissões. Tratam-se de conceitos com conteúdos diferentes, mas a que se atribui a mesma denominação. Este aspeto é muito importante na clarificação e delimitação do *Problema*. Funcionamento estrutural é, pois, *coisa* distinta e diferente do cálculo e dimensionamento de estruturas.

Esta abordagem limitada do conceito “estrutura” na metodologia de projeto é redutora e conforma a própria essência do Problema que neste subcapítulo se está a intentar definir e delimitar, com o objetivo de contribuir para apurar o campo da ideação e assim potenciar a expressão espacial da arquitetura.

Os métodos de representação, analógicos e digitais, têm limitações ou são incapazes de expressar a ação da gravidade e o comportamento do material, ou seja, aquilo que designámos, na senda de Moraes, por gravítica da forma. Este processo é antes de mais um ato mental que decorre do conhecimento fenomenológico (leia-se da ponderação das exigências e implicações do comportamento dos materiais) em função da opção da *forma*.

Este suporte conceptual distancia-se da especulação formal, que encara a forma pela forma, resultando numa geometria descontextualizada do ponto de vista tectónico e, não poucas vezes, esquece os requisitos funcionais e económicos do espaço e dos materiais.

Porque a manipulação geométrica do objeto arquitectónico feita em ambiente digital, a chamada Morfogénese Digital surge desligada de uma consciência fenomenológica estrutural, o funcionamento estrutural daí resultante, embora é certo frequentemente possuidor de forte expressividade formal, enferma muitas vezes estruturalmente de incongruência ou mesmo falta de viabilidade tectónica e estrutural.

Para certas tipologias de formas arquitetónicas, como são as superfícies curvas e as superfícies de dupla curvatura, resulta implícito que a geometria da forma arquitetónica coincide com a geometria da solução estrutural que a pretende suportar. Não existe pois diferenciação geométrica. A configuração volumétrica acaba por ser a mesma. Se noutras aplicações tal poderá ser dispensável, neste caso, faz todo o sentido elaborar e utilizar o conceito de *forma estrutural*. Atente-se que na situação decorrente desta particular aceção, a forma estrutural coincide com a forma dita arquitetónica.

Forma Estrutural é deste modo um conceito pertencente ao foro e campo de atuação da Arquitetura. A *forma estrutural* define espaço; possui materialidade, expressa plasticidade; aporta um significado. E é aqui que ultrapassa o restrito conceito que lhe atribui a engenharia civil, mais focado no dimensionamento. Mas podemos estender o conceito e, no limite, dizer que toda a estrutura possui uma forma, donde faz sentido e tem propriedade afirmar que estamos sempre perante uma *forma estrutural*.

O funcionamento estrutural mais eficiente de determinadas tipologias de superfícies curvas “*exige*” menos trabalho estrutural ao material (ou seja, permite mais adequadamente o caminhar da força) donde acarreta a necessidade de usar menor quantidade de material, na formalização da *forma estrutural*; ou seja, a volumetria advém mais esbelta.

No entanto, a complexidade geométrica destas formas coloca dificuldades na produção e construção, normalmente com o consequente aumento do custo, e, em regra, dos prazos referente à sua materialização.

A pesquisa formal feita com base na fenomenologia estrutural, i.e., o referido *caminhar da força*, vincula a *forma arquitetónica* à *forma estrutural*. Assim, conceber uma, é conceber a outra. Neste paradigma concetual, a ideação da estrutura passa pela manipulação geométrica da forma e, conforme analisaremos em capítulo posterior, quanto mais eficiente for o transporte da *força* pela *forma estrutural*, maior será a esbelteza desta, permitindo criar espaços de maior vão. Contudo, esta posição coloca necessariamente outras questões, que iremos procurar abordar no subcapítulo seguinte.

1.3.2 Problemas específicos

A problemática associada ao projeto e construção de edifícios com superfície curva, acarreta como se referiu em epígrafe, *problemas* específicos resultantes da particular complexidade desta geometria, sublinha-se, das formas curvas.

Vimos que os processos construtivos tradicionais e a produção em série não apresentam soluções para o universo das superfícies curvas, pelo contrário são um problema, na execução e no custo de construção destas superfícies. A ausência de processos e sistemas construtivos capazes de lidar com a maior complexidade geométrica do universo da superfície curva e, em especial, a de dupla curvatura, dificulta, ou inclusive inviabiliza, a edificação com *forma estrutural* curva.

As experiências mais inovadoras no âmbito destas formas estruturais foram produzidas por projetistas, cuja abordagem ao projeto integrava a dimensão construtiva logo na fase de conceção. O *Projeto*, para estes arquitetos era concebido e desenvolvido de modo integrado. O modo de construir decorria e refletia a solução formal ideada, contudo a produção evidenciava uma condição algo artesanal.

Félix Candela chega mesmo a autointitular-se de “*construtor*”. Foi a execução de protótipos a várias escalas, associada à sua presença em *obra*, adquirindo conhecimento sobre o *como fazer*, que lhe permitiu, não só compreender o funcionamento estrutural da dupla curvatura, como também o de encontrar estratégias de construção capazes de materializar as *formas* por si ideadas. (Burger & Billington, 2006: 4)

Exemplo semelhante encontramos no trabalho produzido por Eládio Dieste, onde nos deparamos de igual modo com o vínculo da conceção à construção. A prática profissional de Dieste era apoucada pelos seus pares de então, por abarcar o projeto e o ciclo de construção, prática tida pela elite intelectual da altura, como menor.

A sua presença em obra permitiu-lhe não só obter *conhecimento* no domínio dos processos construtivos, como lhe permitiu ainda compreender as limitações das técnicas utilizadas, e, deste modo, potenciar o desenvolvimento de processos construtivos inovadores, que são a sua identidade e marca. O carácter inovador da sua criação, confere uma expressão plástica única à sua obra (Pedreschi and Theodossopoulos, 2010: 780).

Na obra destes dois projetistas, já referidos, a forma arquitetónica coincide com a forma estrutural, tal como contextualizado, acima, no capítulo denominado de problema geral. Candela e Dieste compreenderam a problemática inerente às formas arquitetónica e estrutural da geometria curva e legaram-nos um importante conhecimento: a complexidade formal da geometria curva exige uma abordagem integrada do ciclo conceitual e do ciclo construtivo.

A desarticulação dos ciclos de conceção e construção, ao que acrescem as lacunas na definição conceptual da estrutura torna esta ainda hoje terra de ninguém. Um processo que procure refletir na conceção a fase construtiva e produtiva é seguramente uma via profícua a explorar. Contudo, o grande salto metodológico decorre da massificação do uso das ferramentas digitalis na atividade de projeto e é o futuro no caminho da eficácia (i.e., na obtenção de resultados válidos quo tale e eficiência (ou seja, na otimização de meios para a consecução desses mesmos objetivos). O digital resolve este problema específico e permite inclusive a personalização do produto, estudando esta problemática ainda na fase de conceção.

Por dificuldade de análise e tratamento das inúmeras variáveis em jogo, a indústria da construção desenvolveu processos standardizados para a produção de superfícies planas, mas não deu resposta do mesmo nível à industrialização das superfícies curvas.

O desenvolvimento das ferramentas digitais permitiu abordar a complexidade *formal* das superfícies curvas no âmbito da representação e da modelação ou seja, o ciclo de Projeto, e as ferramentas digitais são hoje um suporte disponível para a representação e para a pesquisa formal, se se quiser a descoberta da forma ou, ainda, num nível superior, a opção pela otimização da forma, a denominada *form-finding*.

Contudo, os processos de fabricação digital ainda não suportam com eficiência a produção das superfícies curvas e de dupla curvatura. Com efeito, os constrangimentos existentes na construção da superfície curva e na respetiva produção em fábrica, resultam da dificuldade decorrente da sua maior complexidade formal e, sobretudo, da *falha* existente na ligação entre o *Projeto* e o ciclo subsequente da produção e construção.

Note-se que este problema, específico, é também consequência do edifício jurídico presente no fenómeno da construção. A empresa que produz a fábrica, e a que a

constrói, legalmente não são a empresa que projeta. Têm todas inclusive estatutos jurídicos diferentes, embora possam casuisticamente associar-se.

A democratização do computador alterou, quer os processos de pesquisa formal, quer os métodos manuais suportados pela geometria descritiva e pela estática gráfica, bem como o uso e manipulação de modelos físicos. Estes podem agora ser substituídos pelos métodos digitais, o que não só facilita a manipulação geométrica e estrutural, como torna a conceção mais eficaz, eficiente e rápida. Mas não chegam à fase de produção, pois a interoperabilidade entre sistemas digitais dos vários agentes intervenientes, neste momento apenas permite que articulem com dificuldade.

A indústria da construção desenvolveu um aparato tecnológico, baseado em sistemas lineares e tipificados, cuja estratégia é a padronização, visando a diminuição do custo e a facilidade de emprego. Este paradigma tecnológico responde de modo eficaz à materialização de geometria plana, mas apresenta dificuldades no uso da forma curva. O carácter da standardização desenvolvida no pós-guerra dificulta a personalização e apresenta dificuldades construtivas para a produção de superfícies curvas, o que fortemente limita e cerceia a liberdade criativa do arquiteto.

Deste modo, o ciclo construtivo não foi ainda capaz de encontrar soluções eficientes e eficazes para a construção da superfície curva. Isto, para além dos problemas que a gravidade coloca, pois esta, ao exigir uma infraestrutura de suporte durante a fase de construção, acrescenta-lhe a dificuldade do cimbramento e da cofragem curva.

A desconexão e separação dos diferentes intervenientes profissionais na construção da obra arquitetónica conduz por sua vez a uma desarticulação de processos e ciclos, daí resultando desperdício de tempo e recursos, com isso limitando as possibilidades formais e a consequente qualidade.

A manipulação e construção da forma curva exige uma sólida cultura de *Projeto*, na qual o arquiteto deve ser capaz de informar o processo ideativo das dimensões, estrutural e construtiva, sendo o respetivo *conhecimento* determinante neste processo.

Em função da problemática anteriormente colocamos, estamos agora em condições de traçar com segurança e distanciamento analítico, os objetivos pertinentes para presente tese.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos gerais

A tese ora desenvolvida pretende, pois:

- Criar uma metodologia que integre e abarque os diversos ciclos envolvidos no projeto e construção das superfícies curvas e de dupla curvatura;
- Utilizar as ferramentas e os processos digitais na conceção, análise e construção das formas estruturais curvas aportando eficiência à produção/construção de edifícios, de modo a alcançar não só economia nos custos, de construção e manutenção, mas, sobretudo, explorando e aprofundando a espacialidade destas formas estruturais na Arquitetura.
- Criar um processo construtivo adaptado à construção das superfícies curvas, que diminua o tempo e os custos de produção. Pretende-se ainda com esta tese:
- Desenhar um ciclo de produção que tire partido da potencialidade dos processos de fabricação em série, de modo a facilitar a produção das *formas estruturais* curvas, carreando valor plástico para a *peça* arquitetónica que a *forma estrutural* curva potencia e fornece.

1.4.2 Objetivos específicos

A presente tese pretende, ainda, no respetivo decurso testar e aplicar a metodologia de projeto proposta, concretamente o referido paradigma operativo, baseado em ferramentas digitais e conceção integrada do Projeto, através de um estudo de caso.

Desenvolveu-se uma solução construtiva, que se crê ser inovadora, a qual interrelaciona a *forma arquitetónica* com a *forma estrutural*, permitindo deste modo construir as superfícies em abóbada sem recurso a sistemas de cofragem, cavaletes ou cimbramento. Além disso o sistema concebido é ainda capaz de permitir a personalização em massa, através da conjugação de processos de produção em série e digitais, conectando assim seminalmente, o *Projeto* à construção.

O Caso Prático expressa e complementa o pensamento decorrente dos princípios que suportam a tese, tendo sido para tal construída uma abóbada cerâmica, onde foi aplicado o método construtivo proposto.

O processo de edificação desta abóbada, teve também como objetivo desenvolver e testar o desenho de um módulo cerâmico personalizável. Este elemento individual, quando assemblado em cadeia dá origem a uma superfície curva. Os elementos individuais constituintes da abóbada foram produzidos em série, e embora sejam todos iguais, podem ser personalizados, com geometrias variável, possibilitando a geração de formas curvas de diferentes graduação e distintas configurações.

Esta dissertação tem igualmente por objetivo, aprofundar a aplicabilidade de conceitos de forma a melhorar e tirar partido da eficiência estrutural aportada pela superfície curva e, noutra perspetiva estimular o arquiteto a utilizar materiais tradicionais no projeto e conceção de coberturas e, deste modo (se aproveitado) poder dar um contributo para potenciar os “clusters” nacionais da indústria cerâmica.

A construção do referido estudo de caso poderá ser resumido como resultando do recurso a pré-esforço produzido por um cabo metálico, inserido no interior do elemento individual (o módulo), de modo a que a compressão produzida o estabilize, durante a assemblagem da superfície curva, em plena fase de construção. Mostra-se que a construção da abóbada pode ser conseguida sem recurso a cimbramento complexo, com isto se reduzindo o custo e o tempo de construção.

A introdução do digital potencia todo o ciclo, designadamente a exploração de novas formas plásticas, pois possibilita a produção personalizada e diversificada dos elementos individuais.

Na sequência dos objetivos formulados, verifica-se agora, consequentemente, a necessidade de propor e definir um conjunto de hipóteses que permitam explicar e, consequentemente atingir os referidos desígnios. Assim, devemos considerar:

1.5 Hipóteses

1.5.1 Hipóteses gerais

Esta tese tem como escopo conceber e desenhar uma *metodologia de projeto*, enquanto paradigma operativo, que se mostre capaz de dar resposta às necessidades específicas da edificação de superfícies curvas e de dupla curvatura, facilitando assim o uso da geometria curva na arquitetura contemporânea. Deste modo, simultaneamente alargar-se-ia a gramática formal disponível para o arquiteto e potenciar-se-ia a plasticidade dos espaços construídos.

O desenvolvimento deste processo implica, como se adiantou supra, uma abordagem transversal, holística e, sobretudo, integrada dos ciclos de conceção e construção. A abordagem aqui sugerida, e desenvolvida, comporta uma utilização interativa dos meios de, conceção, produção e construção, resultando estes num paradigma operativo que articula o “*problema do projeto*” (programa, lugar, técnica) com o quadro operacional disponibilizado pelas ferramentas e processos digitais.

Com base na problemática formulada, são elaboradas e desenvolvidas duas hipóteses para desenvolver soluções capazes de conceber e construir superfícies curvas e de dupla curvatura de modo integrado. Assim, teremos:

Hipótese 1: Aquela, onde o *Ensaio da Razão Compositiva*, de Edson Mahfuz, se constitui como um suporte teórico, para a geração de um paradigma operativo capaz de articular os meios tecnológicos disponibilizados pelas ferramentas digitais – CAD/CAE/CAM. Procura assim gerar-se assim uma metodologia operativa, que confira solidez teórica à utilização destas ferramentas digitais e à prática do exercício de projeto das superfícies curvas e de dupla curvatura, criando deste modo um pensamento projetual capaz de abordar e alargar de modo integrado a conceção, análise e, sobretudo, construção destas superfícies.

Hipótese 2: Em que se procura teorizar um processo de produção, suportado por um sistema construtivo/estrutural que articula os meios de produção em série, com os meios de fabricação digital, permitindo com isso otimizar e facilitar a construção das formas estruturais curvas, beneficiando conjuntamente dos baixos custos da produção em série, com a capacidade de personalização das ferramentas digitais. É assim possível aliar o fulgor plástico das formas curvas, com as suas potencialidades espaciais, bem como com a respetiva economia

financeira e de materiais, consequentemente potenciando a difusão das formas curvas em Arquitetura.

As hipóteses mencionadas pressupõem, por sua vez, um acervo de procedimentos estratégicos que possam permitir viabilizar e implementar os desígnios a elas respeitantes. E, deste modo, teremos assim:

1.5.2 Hipóteses específicas

As hipóteses específicas resultam das hipóteses gerais, sendo que a sua subdivisão e objetivação operacional, permite encetar uma pesquisa mais controlada e de gradiente mais fino, facilitando assim a análise e desenvolvimento das respetivas soluções. Deste modo, podemos enunciar:

Hipótese 1: Aquela em que o pré-esforço permite gerar um sistema que estabiliza o processo de construção das superfícies curvas, ou seja, dispensa o cimbramento, cavaletes ou cofragens, diminuindo com isso, o respetivo custo de produção, sendo que o módulo cerâmico foi desenhado de modo a permitir a inserção de um cabo metálico no seu interior;

Hipótese 2: Em que se procura teorizar um sistema construtivo baseado num módulo cerâmico produzido em série e personalizável, com recuso a máquinas de corte CNC, i.e., fabricação digital, deste modo abrindo caminho para um conceito que se espera inovador, concretamente o da *fabricação e personalização em série*, o que muito facilitaria a construção das superfícies curvas. Os módulos cerâmicos foram modelados na Oficina da Faculdade de Arquitetura e personalizados no LPR da EKA.

Hipótese 3: Pela qual se pretende postular níveis de eficiência estrutural das formas estruturais curvas, que funcionem com base em tensões de compressão puras, permitindo utilizar os denominados materiais tradicionais e, deste modo, contribuir, se aproveitados, para potenciar os “clusters” nacionais da indústria da cerâmica.

Hipótese 4: A qual assegurar visa que a investigação realizada permite criar um paradigma operativo que consubstancie um quadro teórico, para a utilização do quadro operacional suportado pelas ferramentas digitais CAD/CAE/CAM, assim

potenciando a gestão do que consagramos definir como morfogénese estrutural (i.e., a geração da forma a partir de princípios estruturais, concretamente o *caminhar da força*) das formas curvas e de dupla curvatura.

Hipótese 5: onde o desígnio é a realização de um protótipo, o qual permita aferir a eficiência da metodologia e do sistema construtivo proposto, em súpula, o *Projeto integrado*.

Face ao rumo traçado, impõe-se agora logicamente fundamentar a relevância do rumo investigacional adotado. Temos, pois:

1.6. Pertinência da investigação

A evolução dos processos de computação, adstrita aos princípios matemáticos e geométricos aplicados à computação, que formalizam e permitem a manipulação de entidades como as curvas Spline, Bézier e superfícies NURBS. As ferramentas digitais suportam com grande facilidade, a *conceção* e a manipulação geométrica de formas complexas. Porém, só por si, sem uma metodologia de projeto adequada, estas *per si* não asseguram a garantia de um artefacto arquitetónico, conceptual e materialmente sólido.

Este tipo de abordagem e conteúdo tecnológico suportou um conjunto de investigações focadas unicamente no capítulo da pesquisa *formal*, a *normalmente denominada form-finding*, designada também por Morfogénese Digital, realizadas em instituições como, a *Bartlett School*, *AA School of Architecture*, *Rice School of Architecture*, *Rotterdam Academy of Architecture and Urban Design*, e inclusivamente na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa. Contudo, esta abordagem, por não encontrar valia, potencialidade formal e espacialidade, descartou a respetiva implementação construtiva.

O ambiente digital que a gerou e na qual estas realizações existem, concretamente a morfogénese digital, revela uma parca e difícil contextualização do contexto edificatório, pois esta dimensão da arquitetura não está na génese metodológica própria desta abordagem.

Uma formação académica deve assim vir fundada nos princípios da tríade Vitruviana e na lógica Heideggeriana (do pensar, construir e habitar), pois é da intersecção de ambos que emerge a necessidade de dar expressão tecnológica ao projeto de Arquitetura.

Com efeito, é a sua construção que valida o projeto e é a objetividade material que permite a sua utilização, desígnio primordial da arquitetura ou seja, o Habitar. Por sua vez, é o *habitare* que faz despertar a necessidade e, conseqüentemente encetar uma reflexão, da qual emerge uma reação criativa, que se deparará com o atual “estado da arte” mais comum, o qual evidencia as referidas lacunas tectónicas de alguns exercícios na área da morfogénese digital.

E é, pois, nestes termos que a investigação encetada procurou conduzir a um conceito no qual a forma era gerada a partir de princípios estruturais, ou seja, procurou o *procedere* (o caminhar) da morfogénese digital em direção à Morfogénese estrutural.

Muitas das geometrias complexas definem-se por superfícies curvas, passíveis de ser estruturalmente enquadradas nos “sistemas estruturais de forma ativa e superfície ativa”, os quais são de grande eficiência, mas cuja utilização na prática arquitetónica ainda é escassa, porque a arquitetura não foi capaz de as dominar com a consistência das superfícies planas e, sobretudo, incorporar o *conhecimento* do seu funcionamento estrutural e construtivo, de forma acessível, técnica, económica e massivamente operativa, no plano do ato de *Projeto*.

Torna-se deste modo imperativo que o ciclo construtivo seja dotado de sistemas e processos capazes de introduzir capacidades no ciclo conceptual, permitindo manipular e gerir estas geometrias com eficiência e segurança. Investigar e inovar na área disciplinar das superfícies curvas pensa-se que poderá ser um contributo válido para a criação de uma nova metodologia de *Projeto na* Arquitetura das superfícies curvas.

O que se crê ser o carácter inovador desta tese passa por desenvolver e defender um paradigma onde o suporte teórico de *conhecimento* do específico funcionamento estrutural seja uma variável a entender e compreender pelo Arquiteto, concretamente, o *caminhar da força*, que permita articular, com solidez e eficiência, a *forma* projetada com o sistema produtivo e o processo construtivo.

1.7. Motivação pessoal e trabalho desenvolvido

Do ponto de vista pessoal, o tema da geração da forma com base em princípios estruturais, ou seja, a Morfogénese Estrutural, apoiada numa prática de *Projeto Integrado e Global*, há muito que suscita o interesse do ora candidato, enquanto aluno e arquiteto. Tal interesse começou a germinar nas aulas do Professor António Morais, e profissionalmente constitui-se como o suporte ideativo para alguns dos trabalhos pessoalmente realizados, como é o caso do filtro solar desenvolvido para o Centro-de-Dia do Sagrado Coração de Jesus e de S. José, elaborados em parceria ativa com a Santa Casa de Misericórdia de Lisboa.

No plano científico, a parceria seguida nas aulas de *Tecnologias na Faculdade de Arquitetura* de Lisboa, coordenadas igualmente pelo Professor António Morais tem propiciado a produção de um conjunto de artigos científicos, que despertaram o interesse e a atenção da comunidade científica e académica, ligada ao mundo da Arquitetura.

Desta produção científica destacam-se os artigos: *Flexible Modular System, Production Process of Double Curvature Surfaces Through Digital Manufacturing, Kuricrete System* e *Ethics of Form and Principles of Structural Design: the path of forces*, dos quais em conjunto foram responsáveis por 800 visualizações.

1.8 Metodologia – desenho da tese

Procurando neste momento caracterizar e esquematizar a metodologia posta em prática, haverá a referir que a investigação realizada parte da hipótese de que é possível desenvolver um ciclo de conceção, análise, produção e construção enquadrado por processos digitais. O mesmo implica porém uma definição metodológica prévia capaz de operacionalizar o quadro instrumental disponibilizado pelas ferramentas digitais. Esta abordagem aporta alterações metodológicas e cognitivas no exercício da arquitetura, sendo deste modo possível responder com conforto conceptual e processual ao uso das superfícies curvas na Arquitetura.

As hipóteses formuladas são testadas através da adoção de um caso prático, resultando o seu processo de construção da formulação de uma metodologia desenhada para a conceção de formas curvas, associada a um sistema construtivo gerado para a

construção de tipos diversos de formas. O fluxo de trabalho, (denominado através do anglicismo *workflow*) gerado, é o que permitirá integrar os ciclos de conceção, produção e construção.

A investigação em si é suportada por uma pesquisa teórica, apoiada em revisão literária (qualitativa) que visa *prima facie* consubstanciar o *conhecimento* necessário, para abordar as diferentes áreas que decorrem da implementação do caso prático, sendo assim possível suportar as decisões de modo intelectualmente sólido.

A articulação da revisão literária com o desenvolvimento do caso prático, foi feita de um modo interativo, e dialético, se se quiser, em que o conhecimento da revisão literária suportou a evolução do caso prático.

O método *Investigação/Ação* permitiu por sua vez a evolução, quer do sistema construtivo quer da metodologia, enquanto paradigma operacional para a conceção e construção de formas curvas e de dupla curvatura.

O desenho da investigação realizada pode ser designado como intervencionista, pois recorre à implantação de um caso prático. O processo de investigação iniciado com a revisão literária culmina na construção de dois protótipos, com escala razoável e adequada para realização e prova da ideia inicial. A construção do caso prático, resultou de um processo sequencial que implica um momento de investigação (i.e., descrever e avaliar) ao que se sucede um momento de ação (i.e., planear e agir) conformes ao método de Pesquisa/Ação.

Os protótipos foram sendo desenhados e concebidos, de modo a produzir as alterações necessárias de maneira a consubstanciar um desenho inovador mas sólido, respondendo de modo apropriado ao fim em vista, explorando o funcionamento estrutural da forma curva, associado à aplicação de pré-esforço. Pretendeu-se assim, associar o ato de conceber, à construção da obra, a forma construtiva ao modo de a construir.

Os sucessivos modelos homotéticos, como o arco ou a abóbada produzidos, permitem inferir as respetivas potencialidades e limitações, possibilitando sucessivas correções as quais consubstanciaram a evoluções necessárias para abarcar outras fases e possíveis escalas.

Os protótipos construídos são importantes para a compreensão dos impactos produzidos no tempo a alocar aos diferentes períodos do ciclo construtivo e na economia

da obra, em função da inexistência de necessidade de utilização de infraestruturas de suporte como, andaimes, cavaletes ou cimbres, permitindo deste modo, apurar e reformular o desenho da forma estrutural e dos seus detalhes e respetivos processos construtivos.

A investigação produzida apresenta um carácter qualitativo, decorrente dos processos de avaliação da revisão literária e do desempenho do paradigma operativo e da forma estrutural. Esta avaliação subdivide-se em duas áreas, designadamente, tratamento da informação recolhida e avaliação das inovações produzidas a nível do paradigma operativo desenhado e do desempenho do sistema construtivo concebido.

A investigação passou num primeiro momento pela realização de uma revisão da literatura, focada em autores e projetistas que abordaram as *formas estruturais* assentes na curvatura.

Esta pesquisa procurou, pois, documentar:

- a) Metodologias de *Projeto* onde a tecnologia seja associada ao processo de conceção arquitetónica de formas curvas, e.g., entre outros, Gustavino, Candela e Diest;
- b) Conhecer os processos conceptuais, de manipulação formal e de gestão do funcionamento estrutural, utilizados pelos referidos autores na investigação, ou na sua prática profissional;
- c) A tectónica destas formas estruturais, percebendo os processos construtivos, os diferentes ciclos de produção e os materiais utilizados, e.g., a alvenaria de Diest ou as cofragens curvas de Candela a partir de elementos retos ou, ainda, as escadas de Gustavino;
- d) Os métodos e sistemas de produção utilizados para a construção de superfícies curvas, dos referidos autores;
- e) As potencialidades oferecidas pelas metodologias computacionais e pelas ferramentas digitais para o projeto integrado e para a produção e fabricação, e.g., a modulação e a análise estrutural do edifício, conforme a investigação de autores como Philippe Block;

No caso da metodologia e do sistema construtivo desenvolvidos foram adotados processos de avaliação que têm por base princípios qualitativos, estes permitiram a evolução das soluções propostas.

Assim, na avaliação qualitativa do Paradigma operativo e do Sistema construtivo, teve-se em conta:

- f) Avaliação do Paradigma Operativo concebido; eficácia do fluxo de trabalho desenhado; interligação das ferramentas digitais utilizadas.
- g) Avaliação do desempenho e da interligação dos processos de produção e fabricação, bem como dos ciclos utilizados na execução do caso prático de estudo.
- h) Avaliação do processo de assemblagem das peças cerâmicas e do processo e pré-esforço.
- i) Avaliação sumária da estabilidade da forma construída, através de um teste de carga simples, o que se constitui como uma prática corrente, para este tipo de soluções, em fase de investigação. São disso exemplo a *forma estrutural* em taça desenvolvida pelo Arquiteto Félix Candela, ou pela *free-form Catalan Thin-Tile Vault*, desenvolvida pelo Politécnico de Zurique ETH.



Figura 1.4 – Abóbada em alvenaria, Suíça, Zurique, 2011, BRG, ETH
(“Catalan thin-tile vault”, 2011)

Paralelamente ao percurso de elaboração da tese foi necessário adquirir conhecimento sobre o uso e aplicação de ferramentas digitais, tendo para tal sido necessário desenvolver capacidades na área no âmbito das ferramentas de modelação digital, conseguida através das disciplinas de *Modelação Geométrica e Generativa* e

Laboratório de Fabricação Digital, ministradas pelo Professor Pedro Januário no curso de doutoramento em Arquitetura.

O desenvolvimento do caso prático implicou ainda aprofundar conhecimentos na área do funcionamento estrutural das formas, bem como um estudo com maior profundidade dos vários sistemas de produção e fabricação, *in situ*.

1.9 Contributos da tese-proposta

Esta tese utilizou uma metodologia operativa conducente ao desenho de um projeto que se procurou conduzir à conceção e construção de superfícies curvas e de dupla curvatura. O paradigma proposto, resultante, mapeia os requisitos e as operações necessárias para abordar as formas curvas.

Este paradigma enquadra não só a *criatividade* do arquiteto, como também o desenvolvimento de um projeto integrado. O exercício do projeto nestes termos implica uma alteração do processo cognitivo. Esta abordagem ao projeto é necessariamente suportado pelo *conhecimento* associado à manipulação da forma, aliada a um sistema construtivo capaz de lidar com a complexidade geométrica das superfícies curvas, valorizando a economia de custos e a redução dos respetivos prazos de realização.

Esta abordagem integrada e transversal procura potenciar a utilização das formas curvas, através da articulação entre os momentos de conceção e construção que se tentou analisar, (i.e., decompor uma realidade complexa e voltando a recompô-la em função da ideia do Arquiteto bem como das exigências construtivas) beneficiando assim de uma melhoria em termos de eficiência estrutural, a qual se conseguiu obter mediante a manipulação da geometria, melhor da forma, na medida em que esta sofre afetação material, bem como da expressividade plástica.

O modelo metodológico produzido funda-se numa abordagem holística que procura constituir um contributo para a criação de um novo paradigma no *Projeto* de Arquitetura das formas curvas e de dupla curvatura, operacionalizado por ferramentas digitais.

A abordagem produzida constitui-se como uma reflexão, que tenta identificar alguns problemas, apontar caminhos e testar respostas para um conjunto de temas emergentes na arquitetura atual, que se crê irão pautar o desenvolvimento da Arquitetura nas próximas décadas.

O quadro operacional formado pelas ferramentas digitais não só abre novas possibilidades, como altera o ciclo de conceção da arquitetura. Esta deixa de ser um processo sequencial, para ser um processo que se desenvolve em simultaneidade e interação. A conceção interage em tempo real com a análise e a construção, permitindo assim uma conceção parametrizada, bem como o *feed-back* de reajuste da solução projetada.

Este quadro exige do arquiteto uma solidez metodológica, um quadro mental aberto e, sobretudo, *conhecimento* para suportar e catalisar a sua criatividade. Num quadro mais genérico de objetivos, esta tese constitui-se como uma reflexão crítica sobre os processos conceptuais e metodológicos, respeitantes.

A atual tese parte do pressuposto de que, no processo conceptual, se verifica em casos mais frequentes do que o desejável, uma desarticulação entre a geração da ideia os processos de representação, a compreensão do respetivo funcionamento estrutural, a tectónica e a sua construção, e que esta situação dificulta nalguns casos, a solidez concetual e construtiva da obra ideada.

Já a nível mais específico, no domínio da teoria, este trabalho contribui para a sistematização de um quadro operativo, que suporte o processo criativo e respetiva articulação com o universo tecnológico. A evolução das ferramentas e métodos digitais, têm vindo a produzir alterações na conceção da arquitetura, consoante os recursos que também vêm evoluindo.

A nível prático, e talvez mais relevante para justificar o carácter original e inovador, da proposta contida na presente tese, o trabalho ora apresentado, claramente consubstancia um sistema construtivo capaz de produzir peças construtivas em série e que, em simultaneidade, assegura a possibilidade de estas ser personalizáveis em série, visando concomitantemente a possibilidade de otimização, da conceção, produção e construção de formas curvas, cujo foco (embora possa ser adaptada a qualquer escala) serão as escalas mais correntes, pois é aí que mais se faz sentir a falta de sistemas que produzam formas curvas a baixíssimos custos e que permitam a economia de materiais e dos respetivos impactos.

1.10 Organização da tese

A tese encontra-se dividida em 10 capítulos. A organização reflete o percurso teórico-prático da investigação desenvolvida. Deste modo, elencam-se:

Capítulo I – Introdução

Neste capítulo são enunciados as hipóteses e os objetivos. É identificada a problemática e definido um caso prático, que suporta a resolução deste problema.

Capítulo II – Metodologia

Neste capítulo é apresentado o desenho metodológico e o contexto geral em que opera a tese, recorrendo a processos de investigação de metodologia *pesquisa/ação*.

Capítulo III – A fenomenologia estrutural da forma

O capítulo aborda o potencial da forma, enquanto resultado da forma estrutural, na geração de espaço. O objetivo deste capítulo é a compreensão do funcionamento estrutural da forma, a interação da força com a matéria na geração do envelope arquitetónico e, portanto da morfogénese estrutural, como modo de otimização estrutural e geração de espaço.

Capítulo IV – Geração e manipulação da forma estrutural curva

O capítulo foca-se nos processos de geração da forma estrutural, através de modelos físicos geradores de formas funiculares e anti-funiculares; processos de cálculo gráfico e manipulação formal; ferramentas digitais de estática gráfica. São ainda abordados os princípios de inversão e de construção suspensa.

Este capítulo pretende mapear um conjunto de processos que permitem a manipulação das formas estruturais, tirando partido em simultâneo das potencialidades expressivas, estruturais e espaciais da forma. Estas ferramentas permitem que o projetista adquira uma sensibilidade para os fenómenos que informam o comportamento e a plástica estrutural.

Capítulo V – Aplicação da tecnologia digital à arquitetura

Neste capítulo analisam-se as potencialidades dos meios computacionais que revolucionaram os diferentes momentos na prática da Arquitetura. Reflete-se ainda sobre as alterações que as ferramentas digitais aportaram ao novo modo de conceção. São analisados os modelos de aplicação das ferramentas e processos digitais à prática

da arquitetura e dos seus vários ciclos (modelação, análise e construção). São abordados diferentes binómios de interação: computação e conceção arquitetónica; computação e análise estrutural; computação fabricação e construção; computação e material.

Capítulo VI – Processos de produção

Este capítulo reflete a relação entre a evolução tecnológica e a produção na Arquitetura. Abordam-se aqui as condições manual, mecânica e digital, e os impactos nos sistemas de representação, conceção fabricação e construção, bem como a perspectiva historicista do processo de integração dos computadores na arquitetura, e procurando evidenciar as potencialidades destas ferramentas na prática do *Projeto*.

Capítulo VII – Alvenaria estrutural - Estado da arte

No estado de arte aqui designado por alvenaria estrutural. Analisaram-se e escolheram-se os exemplos mais relevantes no uso de superfícies curvas na Arquitetura. Procurou-se mapear um conjunto de princípios que informam e fundamentam a prática de Projeto, deste modo foi possível o desenho do paradigma metodologia abrangente que acolhe e expressa as diferentes dimensões da Arquitetura.

Capítulo VIII – Paradigma operativo

Neste capítulo descrevem-se os fundamentos e a articulação dos axiomas que informam o paradigma operativo proposto, para a conceção e construção de superfícies curvas e de dupla curvatura.

O encadeamento das tarefas mapeadas define as etapas de trabalho e os desígnios que cada momento de projeto, balizando assim uma prática de projeto.

Capítulo XI – Caso prático

Neste capítulo é descrito o sistema construtivo proposto para a construção de superfícies curvas – Brick-warp, os seus componentes, bem como o processo de produção e construção.

O caso prático funciona não só como *Proof concept*, com o qual se sustenta as ideias os e pcedimentos propostos, mas também como objeto de ensaio e análise, que permitiu sancionar e desenvolver os pricipios agora expostos.

Capítulo X – Conclusões

O capítulo em causa inicia-se com um resumo da investigação desenvolvida. São elencadas as hipóteses de trabalho e os objetivos propostos no início da tese, seguindo-se uma reflexão que visa tirar as conclusões que resultam das soluções proposta e o modo como os problemas identificados foram resolvidos ao longo da investigação realizada. São descritas as soluções encontradas para a conceção e construção das formas curvas e de dupla curvatura.

A realização do caso prático, o qual consistiu numa abóbada *cerâmica* com 3m de vão (facilmente extrapolável para vãos e flechas bastante maiores, não encompassando aqui a opção por diferentes materiais com outro peso próprio) permite avaliar a fiabilidade do quadro operativo concebido, efetuando-se algumas considerações decorrentes da implementação do processo metodológico na construção dos protótipos, concretamente através do método Pesquisa/Ação.

Deste modo foi sendo apurada a fiabilidade da proposta do quadro operativo, sendo paulatinamente introduzidas as alterações decorrentes da avaliação empiricamente detetada e sustentada.

No final elencados, os contributos da tese e analisam-se possíveis linhas de investigação futuras.

Capítulo 2 – Metodologia de investigação

2.1 Introdução

O presente capítulo tem como foco a caracterização e fundamentação do processo metodológico seguido ao longo da tese, aspeto relevante pois a qualidade dos resultados obtidos depende do ciclo de investigação adotado.

Um dos objetivos centrais da tese prende-se com a definição de um processo operativo e metodológico capaz de lidar com o ciclo de conceção e construção das formas curvas. Torna-se por isso importante uma abordagem prévia a alguns métodos, técnicas de recolha, tratamento e análise de dados nas diferentes fases da investigação.

Neste contexto, o desenho de uma metodologia de investigação levanta um conjunto de questões epistemológicas, ou da forma de obtenção do conhecimento, que merecem alguma atenção, no sentido de afirmar e ajustar as suas linhas de atuação.

2.2 Questão epistemológica

Para Hirschheim (1992) o modo como o conhecimento é obtido define a dimensão epistemológica, podendo esta ter uma abordagem positivista ou interpretativa.

Burrell e Morgan apresentam quatro posicionamentos face à investigação, concretamente, funcionalista, interpretativista, humanista-radical e estruturalista-radical.

O posicionamento *funcionalista* parte da suposição de que a sociedade tem existência específica, produzindo um sistema com regras definidas. Na abordagem *interpretativa* sustenta-se o princípio de que a realidade social é produto de uma experiência intersubjetiva dos indivíduos. O posicionamento *humanista-radical* resulta de uma visão subjetiva da realidade, pela qual os seres humanos se tornam reféns de uma realidade que eles mesmos criam e sustentam. Já o *estruturalismo radical* assume uma visão em que a sociedade é a força dominante, estando assim ligada a uma conceção do mundo interpessoal e inter-institucional. (Burrell e Morgan, 1979; Caldas, 2005; Morgan, 2005)

A relação do investigador com o objeto de pesquisa define ainda outras abordagens epistemológicas. Creswell (2003) por exemplo, divide-a em quatro grupos, designadamente, pós-positivista, construtivista, ativista/participativa, pragmática.

A postura pós-positivista caracteriza-se por um entendimento conjectural do conhecimento ou seja, o analista busca intelectualmente aproximações mentais que expliquem a realidade que desconhece. Por sua vez, no posicionamento construtivista os significados são socialmente construídos; poderá aqui perceber-se que o conhecimento resulta não só da não contradição mas igualmente do consenso da comunidade sobre determinados aspetos, pense-se por exemplo, na utilização de células estaminais. O ativismo enquadra pesquisas que apresentam uma agenda política, por exemplo, considerando as necessidades, quer de indivíduos integrados, quer de grupos marginalizados da sociedade. Na abordagem pragmática, o conhecimento emerge da ação, situações e consequências, antevendo o respetivo valor para o sujeito do conhecimento ou grupo que representa. (Creswell 2003)

A abordagem qualitativa segundo Gephart (2004: 454-462) apresenta as seguintes abordagens ao objeto de estudo: positivismo / pós positivismo, interpretativismo e pós-modernismo crítico. Na abordagem positivista, o investigador adota uma posição pragmática, partindo do pressuposto de um mundo objetivo externo à mente. O pós-positivismo suporta a sua abordagem na convicção que a realidade só pode ser conhecida através de probabilidades, definidas obviamente em função do real. O intepretativismo baseia-se na compreensão dos significados, conceitos, meios e fins usados pelos atores sociais no seu contexto de atuação. O pós-modernismo parte de uma base realista e histórica, na qual a construção da realidade é formatada pelos vectores sociais, económicos e políticos que se consolidam com o tempo.

No sentido de fundamentar o desenho investigacional proposto passamos a analisar e fundamentar os métodos utilizados.

2.3 Metodologias quantitativas e qualitativas

A abordagem quantitativa funda-se na linguagem matemática das grandezas e das medidas. Por seu lado, a abordagem qualitativa fórmula uma interpretação das grandezas e daquilo que não é mensurável.

O desenho metodológico deve ter em conta os objetivos do investigador e as suas respetivas condicionantes; estes fatores intrínsecos e extrínsecos revelam-se através dos recursos materiais, temporais e pessoais, os quais devem ser articulados de modo a responder à pergunta de partida da investigação. (Günther, 2006: 201-210)

A abordagem qualitativa apresenta como principal vantagem a flexibilidade na recolha e análise de dados, o que permite que o investigador identifique fenómenos diferentes dos estudados, e esteja mais livre para colocar hipóteses no sentido de determinar novas teorias. (Bartunek; Seo, 2002)

Os métodos qualitativos apresentam fragilidades que decorrem da subjetividade dos dados obtidos, sendo que estes decorrem da interpretação do investigador. (Locke, 1993; Easterby-Smith et al 1991; Rudestam et al 1992)

Porém, apesar de as metodologias quantitativas e qualitativas apresentarem diferenças significativas, elas são contudo, passíveis de ser articuladas de um modo complementar. (Denscombe, 1998)

Numa fase inicial da investigação procurou reunir-se a informação necessária que permitisse consubstanciar e sistematizar a problemática da tese, visando numa fase posterior permitir a formulação dos objetivos e as consequentes hipóteses de trabalho. Existiu ainda a necessidade de constituir um estado de arte que corporizasse as referências especialmente relevantes para o desenvolvimento das soluções propostas, quer a nível teórico (quadro operativo) quer a nível prático (sistema construtivo).

Neste primeiro momento de recolha e análise, os processos qualitativos suportaram o processo de investigação, pelo facto de se ajustarem ao momento correspondente da análise exigida pela dissertação, pois tornava-se imperativo perceber e enquadrar, designadamente, o âmbito da investigação, a problematização subjacente, as vantagens e desvantagens da opção pelo tema, da contextualização da utilização da dupla curvatura no âmbito da Arquitetura, etc.

Como se pode facilmente constatar, o desenho da presente investigação inicia-se através da consubstanciação do respetivo tema, i.e., o tema de investigação. A este passo, segue-se, como não poderia deixar lógica e (con)sequencialmente de ser, a definição da “*problemática*” enquanto enquadramento geral do referido tema, no âmbito do qual se assinalam as respetivas potencialidades e limitações. Desta corporização emergem as intenções da investigação e benefícios previstos (objetivos).

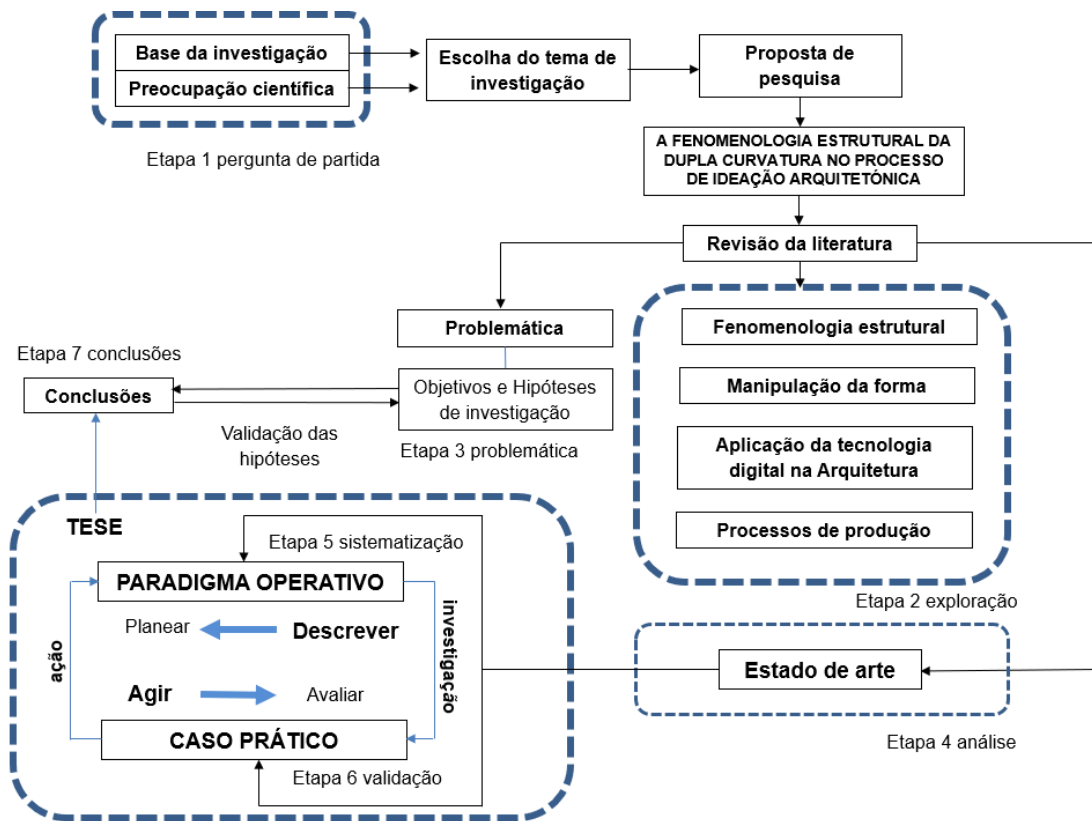


Figura 2.1 – Desenho global da investigação
(do autor)

No presente caso, a tese tem como foco a definição de um quadro operativo que conduza e suporte o ciclo de conceção e a construção de formas curvas e de dupla curvatura na Arquitetura. De igual modo, o referido quadro operativo deve permitir avaliar e refletir sobre as vantagens que a sua utilização aporta. É a concentração neste foco particular que, por sua vez, cria a necessidade de estabelecer um paradigma operativo típico, entenda-se aqui, uma metodologia específica, capaz de abordar as especificidades de conceção e construção deste universo formal.

Uma vez consubstanciado o tema de investigação e a sua problematização, foi delineado um roteiro para pesquisa bibliográfica, através do qual se procedeu à revisão da literatura pertinente, corporizada no índice, o qual poderá ser consultado, supra.

A referida pesquisa exploratória visou assegurar um grau de profunda aproximação e contacto relativamente àqueles autores que tivessem produzido conhecimento ao maior

nível acerca dos problemas relacionados com a implementação construtiva das formas curva na Arquitetura. Esperava-se que pudessem assim apresentar e representar uma posição de excelência e reflexão sobre estas matérias. Para tal, foi efetuado um levantamento bibliográfico sistemático e profundo, abrangendo quer arquitetos, quer engenheiros, quer e, convém não esquecer, aqueles que a si próprios se apelidaram de simples mestres-de-obras.

A recolha de informação formal e informal visou sempre compreender os processos de conceção e construção (bem como as metodologias e princípios operacionais) que suportam a prática de projeto e a construção de formas curvas.

Neste processo pretendeu igualmente aprofundar-se conhecimento, acerca de alguns temas transversais à investigação produzida, na medida em que tal se mostrou essencial, quer para o aprofundamento, quer para a densificação quer, ainda, para a certeza e clareza de exposição do tema-objeto da presente dissertação. Assim, mostrou-se necessário aprofundar conhecimento sobre:

- a) Fenomenologia estrutural: funcionamento estrutural da matéria e das tipologias estruturais básicas;
- b) Processos de pesquisa e otimização formal ou, form-finding;
- c) Computação, i.e., ferramentas e meios digitais aplicados à Arquitetura, principalmente no âmbito da dimensão e do dimensionamento tecnológico, no ato ideativo;
- d) Processos de produção, quer manuais, mecânicos e ou digitais;
- e) Sistemas construtivos, e.g., vernaculares e ou contemporâneos.

A revisão literária foi centrada na interligação das várias dimensões presentes na conceção das formas estruturais e nas implicações que a sua construção acarreta. Pretendeu-se do mesmo modo constituir, como não podia deixar de ser, um suporte para a compreensão das diferentes implicações que a utilização da geometria curva e de dupla curvatura acarretam à prática disciplinar da Arquitetura.

Nesta fase de investigação constituiu-se uma base de informação, que possibilitou aferir e ajustar os objetivos previamente formulados, o que permitiu corrigir algumas das hipóteses propostas no início da pesquisa, limitando a sua abrangência e centrando o âmbito da investigação a produzir.

O conhecimento angariado permitiu deste modo compreender a importância da articulação dos processos de conceção e construção, para uma utilização bem-sucedida e consciente das formas curvas na *Arquitetura*. Ainda, permitiu compreender, estabelecer, aferir e parametrizar uma relação entre o material, a forma, o funcionamento estrutural, a tipologia estrutural e o espaço arquitetónico.

O *estado de arte* permitiu visualizar e corporizar as múltiplas dimensões envolvidas na prática da arquitetura e do projeto das superfícies curvas, em diversos níveis de reflexão e incidência, designadamente, conceptual, tecnológica, simbólica, cultural e, porque não dizê-lo, em certo sentido, ideológica.

Os casos analisados permitiram informar a metodologia desenhada para esta tese. O estudo e análise realizados inspiraram e sustentaram a solução construtiva proposta para a construção das superfícies curvas.

A abordagem sistemática implicou a construção de um processo de análise e de tratamento da informação, tendo sido construído um quadro analítico que de modo ordenado escalpelizou os projetos, por temas de análise, concretamente:

- a) Processo de conceção;
- b) Técnica construtiva;
- c) Funcionamento estrutural;
- d) Sistema estrutural;
- e) Geometria;
- f) Material;
- g) Espessura;
- h) Vão produzido.

Como se foi deixando claro, supra, os métodos qualitativos parecem assim ajustar-se mais a uma fase exploratória na qual o objeto de estudo se encontra numa etapa de caracterização, podendo ainda recorrer-se a processos quantitativos que permitam posteriormente sistematizar o objeto de estudo.

Consolidada a problematização e o commumente chamado “estado da arte”, surge a necessidade de formular os objetivos da tese e as respetivas hipóteses de trabalho, na medida em que o referido estado de arte possa, ou não responder, ou não responder do modo exigível, ou com a eficácia ou a eficiências requeridas.

Por sua vez, diagnosticadas as debilidades e fragilidades teórico-práticas do objeto de estudo são aventadas novos pressupostos, abordagens e teorias, focadas em fazer evoluir o conhecimento específico.

Como é tradicional na doutrina científica, nesta nova fase recorreu-se ao processo hipotético dedutivo.

2.4 Metodologias hipotético-dedutivas

O processo de investigação adotado, antecipadamente referido, concretamente, o método hipotético dedutivo, baseia-se numa teoria pressuposta, validada ou validável à condição. Popper (1999) afirma, sagazmente que numa teoria apenas se consegue comprovar a sua falsidade, dado que na observação, o objeto não está livre de pressupostos e teorias prévias. Deste modo uma teoria permanece valida até que seja refutada.

O método hipotético dedutivo permite assim a identificação dos problemas existentes nas teorias que a cada momento suportam o estado do conhecimento. É com base nesse estado de consciência que é possível formular as hipóteses que poderão ser testadas, para encontrar uma solução capaz de responder aos objetivos formulados, no âmbito da problemática subjacente. Este método permite a comparação das leis e das teorias a testar, explicando de um modo mais objetivo e racional o problema inicial e, consequentemente, a solução correspondente.

O método hipotético dedutivo de Popper suporta-se na dedução, procurando eliminar os possíveis erros contidos na hipótese ou seja, a falsidade de uma proposição. Deste modo, é possível estabelecer-se uma situação ou resultado experimental que negue essa hipótese e tenta-se realizar experiências que comprovem essa inviabilização. Assim, a abordagem do método hipotético-dedutivo busca a verdade (mais do que através da comprovação) através da eliminação de tudo o que é falso, pois em Ciência, a verdade é contingente, sendo aliás, por isso que ela é valiosa.

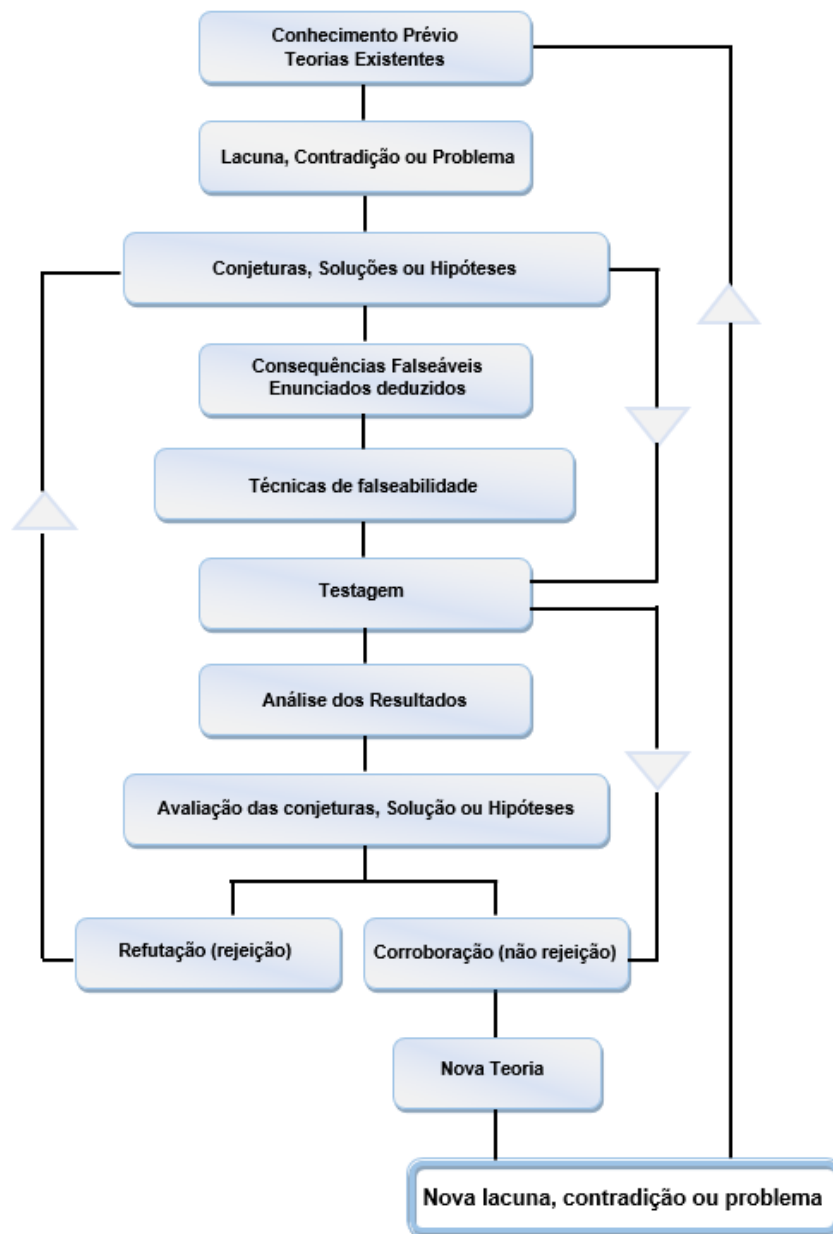


Figura 2.2– Diagrama do método hipotético dedutivo, formulado por Popper
 (“Lógica da pesquisa científica”, 1975)

O conhecimento busca compreender, descrever e validar a teoria (e, paradoxalmente, a teoria busca compreender, descrever e validar o conhecimento) resultando assim de (e numa) teoria científica. Esta resulta de uma conjectura provisória, que pode ser reformulada e reconstruída pela utilização de premissas qualitativas, usando a lógica para tal. (Popper, 1999)

Uma vez feita a caracterização do estado de conhecimento, identificados as suas lacunas e formuladas as suas hipóteses de trabalho, surge a necessidade de gizar um processo de atuação que permita validar e desenvolver os novos pressupostos ou, dito de outro modo, que não possa concluir pela sua inviabilização.

As hipóteses colocadas como foco de investigação, colocam em evidencia a necessidade um processo de investigação capaz de fazer evoluir sistemas e processos de trabalho que permitam acompanhar essa dinâmica. Por tudo isto, é possível concluir que a metodologia denominada *Investigação-ação* surge assim como o método mais adequado e capaz como ferramenta de suporte para a presente investigação.

2.5 Investigação-ação i.e., *Action-research*, ou, *Pesquisa-acção*

A *Action-research* é um processo de investigação cujo foco é a resolução de problemas e produção de diretrizes por práticas mais eficazes, através de um processo que aglutina a reflexão e a prática, para resolver de modo progressivo um problema existente.

O professor do MIT, Kurt Lewin utilizou pela primeira vez o termo "*Investigação-ação*" (*Action-research*) em 1944. Num artigo científico que intitulou de "*Action Research and Minority Problems*", descreveu um processo de pesquisa que alterna momentos de investigação, com a de implementação ativa das reflexões decorrentes da investigação.

A definição do conceito da metodologia *Investigação-ação* é difícil de fazer, pois esta pode apresentar-se sob múltiplos aspetos; face ao potencial de aplicação, a sua implementação difere de caso para caso, sendo contudo um processo natural que resulta de uma atitude empreendedora, que se foca no saber (como) fazer conjugado com a solidez teórica.

Após Lewin ter definido o conceito de "*Investigação-Ação*", foram considerados quatro abordagens diferentes; "Pesquisa- ação, Pesquisa-Diagnóstico, Pesquisa-Participativa, Pesquisa-Empírica e Pesquisa-Experimental". (Tripp apud Chein et al, 1948: 43-50)

Entre as décadas de 40 e 50 do séc. XX, o emprego destes processos permitiu desenvolverem-se aplicações em várias áreas como, "a administração (Collier), o desenvolvimento comunitário (Lewin, 1946: 34-36), a mudança organizacional (Lippitt, Watson and Westley, 1958) ou o ensino" (Tripp apud Corey, 1953: 514).

Na década de 70 do séc. XX, incorporou-se na ciência política produzindo mudanças na consciencialização e outorga de poder (Freire, 1982), “no desenvolvimento e planeamento estratégico e na agricultura (Fals-Borda, 1991) e, mais recentemente, em negócios bancários, saúde, geração de tecnologia, via Banco Mundial e outros” (Tripp apud Hart; and Bond, 1997).

Os processos de Investigação-ação apresentam um ciclo metodológico e operativo próprio que importa conhecer e ter presente ao longo do trabalho desenvolvido.

2.5.1 O ciclo da investigação-ação

O espectro da metodologia “*Investigação-Ação*” é vasto, sendo uma das várias designações para discriminar “um processo que siga um ciclo, no qual se aprimora a alternância sistemática entre o agir no campo da prática” e o investigar dentro da teoria, tendo ambos os procedimentos, por base, o mesmo âmbito, usando vetores como que opostos.

O ciclo no seu todo pode ser descrito como planejar, agir, descrever e avaliar as mudanças para melhorar a prática, apreendendo “mais, no correr do processo, tanto a respeito da prática quanto da própria investigação”, quanto da (in)adequação da hipótese ou teoria em causa, permita refazê-las para que melhor possam explicar a realidade subjacente.

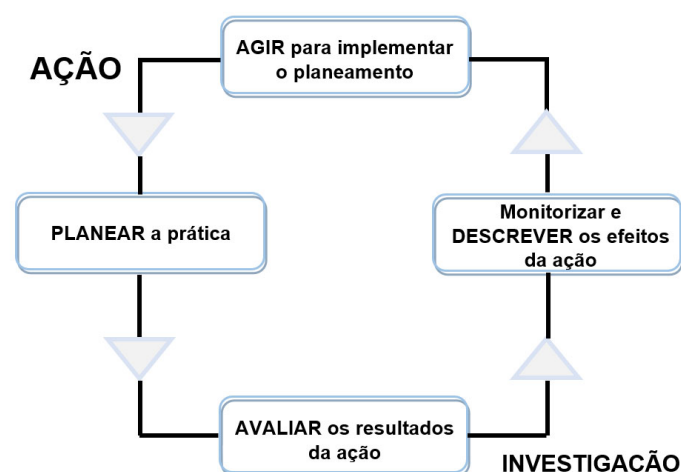


Figura 2.3 – Representação em quatro fases do ciclo básico da investigação-ação
 (“Pesquisa-Ação: uma introdução metodológica”, 2005: 446)

A maioria dos processos que visam o incremento de soluções segue o mesmo ciclo metodológico; assim, a solução de um problema começa com a colocação de uma qualquer questão e com a constatação de uma falta ou inadequação da respetiva resposta, por falta ou inadequação da respetiva teoria. São estas que, posteriormente conduzem à identificação do problema, à colocação de hipóteses (de justificação do problema ou de achamento de uma solução) que levem daí, ao planeamento de uma solução, à sua testagem e (contra) verificação. Concomitantemente, coloca-se a necessidade da monitorização e avaliação da respetiva eficácia, posteriormente da sua revisão (eventualmente, peer to peer) levando estas, por fim, a procedimentos de protocolo, implementação e divulgação de resultados.

Este processo apresenta um conjunto de analogias e pode ser comparado ao ciclo de diagnóstico e tratamento médico que também seguem estes requisitos: monitorização de sintomas, diagnóstico da doença, prescrição de (proposta de) tratamento, administração de medicação, efetuando-se tratamento, seguindo-se a monitorização e avaliação dos resultados. Sendo o caso, suficiente exótico, haverá lugar aos referidos, revisão, protocolo, implementação e divulgação de resultados.

A maioria dos processos segue o mesmo processo, quer seja no âmbito do desenvolvimento pessoal, profissional, ou de um produto ou política de desenvolvimento. É evidente, porém, que a aplicação e desenvolvimento da Investigação-ação tem como resultado diferentes abordagens, em função dos diferentes fins e cada fase é personalizada de um modo diferente, em função do âmbito e da etapa de cada abordagem.

Algumas das variantes do processo investigação-ação estão catalogadas sendo aqui apenas elencadas algumas denominadas de; “*Pesquisa-Ação* (Lewin, 1946), *Aprendizagem-Ação* (Revons, 1971), *Prática Reflexiva* (Schön, 1983), o *Projeto-Ação* (Argyris, 1985)”, para um maior conhecimento consultar David Tripp *Pesquisa-ação*.

Existem várias razões para a existência de todas estas designações, tal resulta da conceptualização de ciclos operativos e do desconhecendo das versões e designações já existentes, denominando o mesmo ciclo e suas etapas de um modo próprio. Como apropriadamente refere Tripp:

“...Tipos diversos de Investigação-Ação tendem a utilizar processos diferentes em cada etapa e obter resultados diferentes que provavelmente serão relatados de modos diferentes para públicos diferentes.” (Tripp, 2005: 443)

Assim, pode dizer-se que o tipo de processo a utilizar decorre dos objetivos a alcançar e do respectivo contexto ou, como diria Ortega y Gasset “Yo soy yo y mi circunstancia”. Ou seja, mesmo partindo com os mesmos desígnios e contexto, diferentes investigadores chegaram a resultados diferentes, em função de “diferentes competências, objetivos, cronogramas, níveis de apoio”, capacidades tecnológicas, modos de colaboração e assim por aí adiante. Todo e qualquer enquadramento afetará, pois, os processos e os resultados. O importante é que este tipo de *Investigação, maxime, qualquer método* utilizado revele adequação aos objetivos, práticas, participantes ou situações (facilitadoras ou restritivas).

2.5.2 As características da Investigação-ação

Citando Grundy et altri, numa definição mais aberta, a caracterização do método *Investigação-acção* consistirá na:

“identificação de estratégias de ação planeada que são implementadas e, a seguir, sistematicamente submetidas a observação, reflexão e mudança”.
(Grundy and Kemmis, 1982)

Já numa definição mais estrita, a:

“investigação-ação é uma forma” ... “que utiliza técnicas de pesquisa consagradas para informar a ação que se decide tomar para melhorar a prática”.

A isto acrescerá que estas pesquisas “devem atender aos critérios comuns a outros tipos de pesquisa acadêmica”, ou seja, passar designadamente por uma revisão produzida pelos seus pares, quanto à significância, originalidade, validade, etc.

“A *investigação-ação* requer ação, tanto nas áreas da prática quanto da pesquisa, de modo que, em maior ou menor medida, as suas características resultem tanto da prática, cientificamente validada, quanto da pesquisa científica” (ainda que teoricamente) validável (e, ainda que, apenas potencialmente) aplicável.

A *investigação-ação* tende a ser pragmática, contudo esta, fora de uma lógica estritamente empírica, enquanto pesquisa, diferencia-se da pesquisa científica convencional. Com efeito, a *Pesquisa-ação* ao mesmo tempo que transforma o objeto de estudo que está a ser pesquisado, é condicionada pelo contexto e pela ética da prática. (Tripp, 2005: 447)

A tabela a seguir mostra as diferenças da *Investigação-ação* em relação a outras metodologias, como a Prática Rotineira (em que esta tende a reagir às ocorrências, constituindo uma rotina, tendo sido tanto inovadora quanto original), ou a Investigação (conceito que enquadra a operação de acordo com protocolos metodológicos pré-determinados).

Características da Investigação-Ação			
Linha	Prática Rotineira	Investigação-Ação	Pesquisa Científica
1	Habitual	Inovadora	Original/ financiada
2	Repetida	Contínua	Ocasional
3	Reativa contingência	Pró-ativa estrategicamente	Metodologicamente conduzida
4	Individual	Participativa	Colaborativa/ colegiada
5	Naturalista	Intervencionista	Experimental
6	Não questionada	Problematizada	Contratual (negociada)
7	Com base na Experiência	Deliberada	Discutida
8	Não-articulada	Documentada	Revisada pelos pares
9	Pragmática	Compreendida	Explicada/ teorizada
10	Específica do contexto		Generalizada
11	Privada	Disseminada	Publicada

Tabela 2.1 – Caraterísticas do processo Investigação-Ação
 (“Pesquisa-Ação: uma introdução metodológica”, 2005: 447)

A Investigação-Ação ficará, assim, “entre os dois, porque é proactiva com respeito à mudança e é hábil no sentido de que a ação decorre da compreensão alcançada por meio da análise das informações” pesquisadas.

A metodologia é estruturante na Pesquisa Científica; já na Investigação-Ação, a metodologia de pesquisa, embora também o seja, deve ser subserviente em relação à “prática, de modo que não se decida deixar de avaliar e procurar a mudança por não se dispor” de dados básicos adequados, ou seja, ela torna-se paradoxalmente (ainda) mais determinante, na medida em que se subordina aos objetivos e aos resultados da reflexão, a cada momento, sobre a ação, com vista assegurá-los. Dito de forma mais prosaica, “procura-se fazer julgamentos baseados na melhor evidência que se possa produzir” a cada momento e agir em função dessa avaliação, com vista a assegurar determinados resultados.

A investigação-Ação é sempre, não só deliberada, enquanto resultante de uma intencionalidade livremente dirigida pelo intérprete, como deliberatória, na medida, não tanto em que resulta de uma decisão coletiva, mas de uma decisão fruto de uma relação entre diversas realidades e ou princípios ou valores, designadamente, da prática e da teoria, que se conjugam para a obtenção de um determinado resultado. Nessa medida, quando se intervém, é preciso fazer julgamentos competentes a respeito daquilo que mais provavelmente aperfeiçoará a situação e de um modo mais eficaz. A pesquisa científica é, pois, discutida no sentido formal de uma teorização indutiva e dedutiva, na medida por um lado, em que parte, ascendendo, do individual e ou do concreto para o geral e ou o abstrato, ou, ao invés, por outro, parte, descendendo, destes níveis para aqueles.

Esses processos – Investigação-Ação, não resultam em conclusões e previsões positivistas, estas são muito distintos daquilo que se consideram como bons julgamentos profissionais.

A investigação produzida através da metodologia Investigação-ação, apresenta uma necessidade constante de compreender, de saber (relacionar) as ocorrências, para projetar mudanças que melhorem o processo, procurando otimizar a situação ou o modelo em causa.

As teorias são processos conceptuais concebidos para explicar novos conhecimentos e constituem o alvo primordial da Pesquisa Científica, buscando uma generalização o mais ampla possível. Na Pesquisa-Ação, é indispensável explicar os fenómenos, não

tendo como objetivo corporizar uma rede de esclarecimentos ou teorias de carácter científico, pelo menos para além do âmbito dado e a cada momento (re) avaliado.

O conhecimento “obtido na Pesquisa-Ação destina-se, na maioria das vezes a ser compartilhado com outros na mesma organização ou profissão; e tende a ser disseminado por meio de rede profissionais, não tanto, através de publicações como acontece” também com a Pesquisa Científica.

Esta metodologia constrói-se através de uma relação dialética no âmbito da prática e da pesquisa. Neste contexto, é essencial não perder de vista a Pesquisa-Ação como um processo no qual os práticos podem recolher “evidências a respeito das suas práticas e pressupostos críticos, crenças e valores subjacentes a elas”. (Tripp apud Elliott, 1991:209)

McNiff (2002) afirma que a “Investigação-Ação implica ter consciência dos princípios que conduzem o nosso trabalho: ter clareza a respeito, tanto do que estamos” a fazer, quanto da razão porque fazemos o que estamos a fazer.

2.5.3 O relatório da Investigação-ação

Este relatório

que se segue é um esquema de um típico relatório de estudo de caso de *Pesquisa-Ação*, o qual pode ser utilizado para qualquer projeto e também é adequado para dissertações, designadamente esta. Conforme pode ler-se em Tripp, David, *Investigação/Ação: Uma introdução metodológica Educação e Pesquisa*, 2005 São Paulo, págs 443/466, 2005, a sua proposta estrutura:

1 Introdução: intenções do pesquisador e benefícios previstos

2 Reconhecimento (investigação de trabalho de campo e revisão da literatura)

2.1 - Da situação

2.2 - Dos participantes (o próprio e outros)

2.3 - Das práticas profissionais atuais

2.4 - Da intencionalidade e do foco temático inicial

3 Cada ciclo

- 3.1 - Planeamento: da temática (ou ciclo anterior) ao primeiro passo de ação
- 3.2 - Implementação: relato discursivo sobre quem fez o quê, quando, onde, como e por quê.
- 3.3 - Relatório de pesquisa sobre os resultados da melhoria planeada:
 - 3.3^a - resumo e base racional do(s) método(s) de produção de dados
 - 3.3b - apresentação e análise dos dados
 - 3.3c - discussão dos resultados: explicações e implicações.
- 3.4- Avaliação
 - 3.4a – da mudança na prática: o que funcionou ou não funcionou e por quê
 - 3.4b – da pesquisa: em que medida foi útil e adequada.

4 Conclusão:

- 4.1 Sumário de quais foram as melhorias práticas alcançadas, suas implicações e recomendações para a prática profissional do próprio pesquisador e de outros.

Esta etapa da investigação passou por testar e aperfeiçoar o modelo metodológico proposto (paradigma operativo) na presente dissertação, tendo-se recorrido para tal, a ciclos sucessivos de construção e avaliação de protótipos, a várias escalas. A construção de vários protótipos e modelos, visa compreender a interligação e a dinâmica, entre a definição da forma curva e a sua construção.

A realização dos protótipos foi feita de modo a que as várias escalas abordadas funcionassem como um ciclo de investigação, subdividindo-se este em duas partes, a saber, construção – *Agir* e avaliação – *Investigar*.

A cada ciclo de *Ação* concretizado através da construção de um protótipo, no qual eram implementadas as melhorias planeadas, seguia-se um ciclo de *Investigação* no qual eram monitorizados os efeitos decorrentes das modificações implementadas, efetuando-se ainda uma avaliação, intercalar, para compreender o impacto das alterações efetuadas e perspetivar as inovações necessárias, com vista a melhorar o modelo nas suas diferentes componentes e a otimizar o processo.

Face aos resultados, foi planeado um novo ciclo de investigação, o qual foi progressivamente suportado pela avaliação obtida e pela pesquisa decorrente da avaliação, tendo ainda presente dar-se resposta aos novos desafios que a nova escala coloca.

Os ciclos alternados de *Ação* e *Investigação* que caracterizam a metodologia *Action-Research*, permitiram antever e resolver dificuldades decorrentes do desenvolvimento do processo e da passagem de escala.

2.5.4 Conclusão

Na academia, o termo “Investigação-Ação” expressa uma metodologia que cumpre claramente e atende aos critérios da pesquisa de carácter científico, os quais por sua vez atendem “claramente aos critérios da pesquisa académica. Isso parece estar de acordo com antigos trabalhos sobre Pesquisa-Ação” e, de facto, com definições recentes tais como a de Elliott (1991:69).

Com efeito, uma *Investigação-Ação*, na qual se empregam técnicas de pesquisa, de qualidade suficiente para enfrentar a crítica dos pares na universidade, não só atende aos requisitos científicos como permite ainda informar o planeamento e a avaliação das melhorias obtidas.

No mínimo, poderá, pois, desde já adiantar-se cumprir estritamente esta dissertação ambos os critérios de precisão, académicos e de pesquisa científica, na medida em que a utilização desta prática metodológica não permite claramente dissociar no âmbito do rigor da pesquisa empreendida, o rigor da não contradição lógica e factual ou que a demonstrabilidade dos factos aí presentes, não seja uma exigência intelectual de valor igual ou equivalente àquela exigível, face a meios estritamente não académicos ou não universitários, em que se siga igualmente o rigor científico.

Capítulo 3 – Fenomenologia estrutural

3.1 Funcionamento estrutural na arquitetura

Segundo Moraes, para a elaboração da referida *metodologia de projeto integrado*, objeto desta dissertação, importa introduzir e definir o conceito de *funcionamento estrutural* no âmbito e ao serviço do projeto de arquitetura.

Na engenharia, o funcionamento de uma estrutura está associado ao cálculo da tensão num ponto, enquanto que na arquitetura o funcionamento que interessa analisar, e compreender, é o *modo de transporte* da força ao longo de cada tipologia estrutural, bem como qual o caminho que a força segue até ao apoio. Esta é a grande diferença conceitual e doutrinária entre arquitetura e engenharia relativamente ao fenómeno estrutural.

Ao invés, ao arquiteto interessa a forma global e o funcionamento de conjunto, enquanto o engenheiro está focado no ponto, no cálculo e no dimensionamento relativo ao estado de tensão no ponto. Estes últimos conceitos são estranhos e desconhecidos para o arquiteto, pois não participam na ideação da forma, inclusive da elaboração da forma estrutural.

Arquitetura e engenharia são assim diferentes no campo científico e programático no que ao fenómeno estrutural respeita. Não são sequer a mesma coisa, embora possam de certa forma confluir nalguns aspetos.

Neste capítulo, define-se o conceito de *funcionamento estrutural*, enquadrando-o no processo cognitivo da *criatividade* do arquiteto no seu trabalho ideativo de geração da forma arquitetónica, bem como da forma estrutural.

Estrutura, é sobretudo, o instrumento conceitual que explica a existência física e material da edificação, ou seja, o fenómeno mecânico da *matéria* envolvido na geração de espaço na Arquitetura. Convém porém sublinhar que este conceito de *estrutura* é em certo sentido intangível, pois não pressupõe a existência de qualquer elemento físico específico construído, donde se conclui haver Arquitetura sem a presença da entidade física estrutura.

Esta é uma outra diferença científica e conceitual entre Arquitetura e Engenharia. Para a engenharia *estrutura* expressa a existência de uma estrutura, como entidade portante autónoma, enquanto para a Arquitetura, *estrutura* significa o *funcionamento* estrutural do conjunto dos materiais presentes na edificação.

O conceito *estrutura* é tão só o funcionamento do material empregue no edifício, sem recurso a uma entidade autónoma e independente, que é aquela que a engenharia designa por estrutura. Como se procurou aproximar o leitor na introdução, tratam-se de palavras iguais, mas com significados científicos diferentes.

A *estrutura* da engenharia é uma entidade física, tangível, constituída por material, seja aço, madeira, betão, alvenaria, ou qualquer outro, elementos constituintes físicos, concatenados e que compõem ou verdadeiramente constituem a *estrutura autónoma e independente do edifício*. Neste contexto a *estrutura* é, sobretudo, o *sistema estrutural*, enquanto que, na Arquitetura, *estrutura*, é um *modelo conceitual* que explica como a matéria transporta a *força* através do edifício até às fundações.

Para a Arquitetura, na análise da atividade do conceito *estrutura*, importa, sobretudo, compreender que, esta, fornece e realiza uma *função*, qual seja a de garantir o transporte da *força*, i.e., o denominado *funcionamento estrutural*.

Analisemos e caracterizemos, então, a fenomenologia envolvida no *funcionamento estrutural*, enquanto função determinante e essencial para garantir a existência estática do edifício. O funcionamento estrutural é um conceito cognitivo, que ajuda o homem a interpretar como a natureza transporta a força.

Para compreender o fenómeno estrutural, a humanidade inventou o conceito *força*. Este conceito pretende simular o resultado físico da existência de uma ação ocorrente e atuante sobre os edifícios. Qualquer ação é, assim, modelada, no sentido mais próprio de simulada, através deste conceito *força*. (Moraes, 2016)

Resulta então claro que, sendo um conceito explicativo inventado pelo homem, as forças não existem na realidade. São antes abstrações intangíveis que ajudam a humanidade a compreender o fenómeno estrutural e, sobretudo, suportam o tratamento matemático que permite à humanidade desenvolver teorias que preveem e predizem o comportamento da estrutura, enquanto realidade física existente.

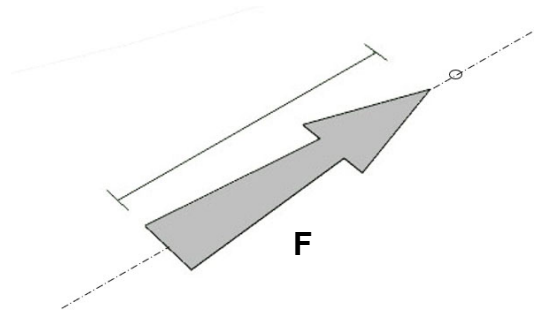


Figura 3.1 – Representação gráfica do conceito *força* (direção, sentido, intensidade, ponto de aplicação)
(do autor)

Dizemos que uma *força* é uma entidade que possui representação gráfica e se caracteriza por possuir uma *direção*, um sentido, uma intensidade e um ponto de aplicação (cfr. Fig. 3.1).

O conceito força significa movimento ao longo da sua direção e segundo o seu sentido. Esta é a grande característica associada ao conceito força – o movimento. Com efeito, desta definição, uma conclusão se retira de imediato, qual seja a de que, se nada mais ocorrer, a força movimenta-se, ou seja, não fica estática. Dizemos, então, que a força não está em equilíbrio. Não estar em equilíbrio significa que há (está em) movimento.

E, deste modo, a estática é a ausência de movimento ou seja, esta afirmação é uma consequência necessária da elaboração do conceito - força.

Percebemos, então, muito facilmente que, para que a força não se movimente, é necessário que apareça uma outra *força* (reação) que se lhe oponha e e que pare o movimento desta *força* inicial (a qual, por antagonismo denominaremos agora, reação). Esta nova *força* deve ter a mesma *direção*, intensidade e ponto de aplicação que a *força* inicial, mas o seu sentido será o inverso desta.

É este o grande princípio da Estática, que todo o ser humano compreende e facilmente interioriza. Denominamo-lo por Princípio do Equilíbrio Básico de Forças: Para que não ocorra movimento de uma dada força, caracterizada por uma direção, um sentido, uma intensidade e um ponto de aplicação, é necessário contrapor uma outra força com a mesma direção, sentido oposto, a mesma intensidade e o mesmo ponto de aplicação.

Este princípio tem igualmente uma representação gráfica (cfr. Fig.3.2, infra).

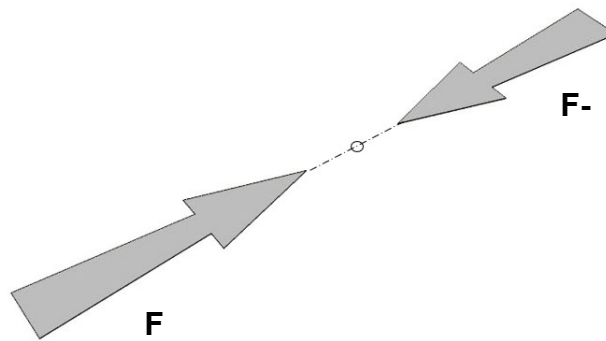


Figura 3.2 – Princípio do equilíbrio básico de forças (ação reação)
(do autor)

A explicação e compreensão do *funcionamento estrutural* decorre então da assimilação cognitiva deste princípio. Senão, vejamos.

O princípio acima enunciado é abstrato, pois nele não há matéria envolvida. Contudo, e para demonstração, ir-se-á agora aplicar este princípio a um corpo tangível, com existência física, tal como se apresenta na Fig. 3.3, infra.

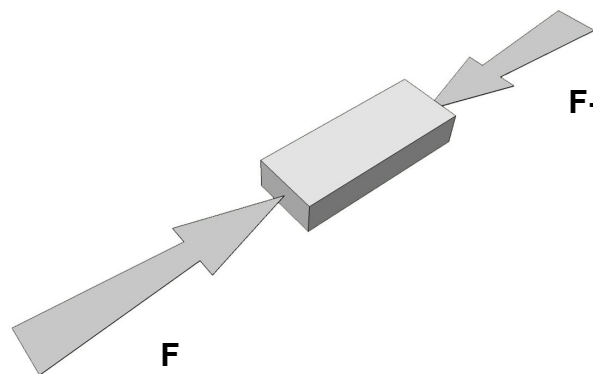


Figura 3.3 – Princípio do equilíbrio básico de forças aplicado a um corpo
(do autor)

Da Fig. 3.3 supra podemos constatar que as duas forças A e R não têm o mesmo ponto de aplicação. Então, de acordo com o princípio do equilíbrio básico de forças, acima elaborado, se não têm o mesmo ponto de aplicação, não há equilíbrio, ou seja, ocorre

movimento. É o que postula componentes daquele princípio, enunciado acima, concretamente: “o mesmo ponto de aplicação”.

Suponhamos, por facilidade de raciocínio, que a força R está “adormecida” no apoio, somente “acordando” quando lá chegar a força A. Então, a força A vai ter que se movimentar até que encontre a força R, e, aí, finalmente, com o encontro dos pontos de aplicação das duas forças, verifica-se o princípio do equilíbrio básico de forças; ou seja, pára o movimento.

O primeiro homem que teorizou e explicou esta fenomenologia foi o britânico Hooke, no séc. XVII. Este percebeu que a matéria não é contínua e, em consequência, elaborou, em termos históricos, o primeiro modelo explicativo da composição da matéria, hoje em dia, conhecido por *modelo de Hooke* (cfr., Fig. 3.4).

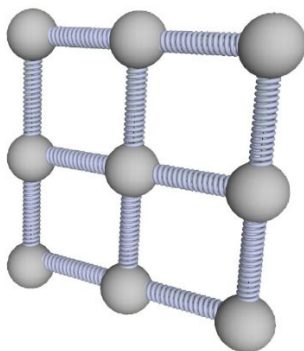


Figura 3.4 – Modelo de Hooke, 1642
(do autor)

Hooke asseverou que a matéria é constituída por partículas separadas entre si, materialmente, mas, no entanto, ligadas umas às outras, através, segundo ele, de elásticos. Na sua visão, elásticos mais não são que molas, idênticas às utilizadas nas suspensões de automóveis, carruagens ferroviárias ou, até, inexistentes no seu tempo, aviões.

Sempre que uma partícula é atuada por uma força A, aquela desloca-se, mas este deslocamento não é infinito, tem um valor máximo (cfr., Fig. 3.5). Com efeito, como a partícula está ligada a outras, através dos elásticos (as ditas molas), então, o movimento fica condicionado a um valor máximo, que é o valor máximo permitido pela capacidade

de deformação do elástico (mola). Quando este atinge o seu máximo de deformação, a partícula pára o seu movimento, e, neste instante, transfere a força A para a partícula seguinte.

A partícula seguinte, atuada pela força A que chegou até ela, movimenta-se, e, tal como a primeira partícula, somente para o seu deslocamento, quando os elásticos (molas) que a ligam a outras partículas, atingem o máximo de capacidade de deformação. Neste instante, a força transfere-se para a partícula seguinte. O processo repete-se, até que a força A percorra todo o corpo e chegue ao apoio, onde finalmente encontra a outra força R, e, aí, finalmente, verifica-se o princípio do equilíbrio básico de forças, parando-se o movimento da força A. Dá-se como que um “casamento” entre as duas forças. Esta transferência da força A de partícula para partícula, até que alcança, no apoio, a força R, é, nesta dissertação, designada pelo *caminhar da força*.

Repare-se que as partículas atuadas pela força A deslocam-se, aproximando-se ou afastando-se, umas das outras, consoante o sentido da força A. Se as partículas se aproximam entre si, tal significa que o comprimento do corpo encurta. Pelo contrário, se as partículas se afastam, o mesmo significará que o corpo aumenta de comprimento. A esta mudança de comprimento do corpo designamo-lo por *deformação*.

A *deformação* do corpo é assim vital para que a força caminhe, donde se conclui que sem deformação não há, não pode haver, equilíbrio estático.

A entidade responsável pelo transporte da força ao longo do corpo é a *deformação* ocorrente. Sem deformação não há transferência de força de partícula para partícula. O trabalho de deformação é, assim, vital, para que a força vá caminhando ao longo do corpo, buscando o encontro com a força R, que a espera no apoio. A este trabalho de deformação chamamo-lo de *trabalho interno da estrutura atômica constituinte do material*. Trata-se, na realidade, do movimento relativo empreendido pelos átomos, aproximando-se, afastando-se ou distorcendo.

Deste modelo de Hooke retiramos três grandes conclusões: 1º) *as forças caminham ao longo da estrutura*; 2º) *para que as forças sejam transportadas ao longo do corpo é necessário que ocorra deformação do corpo e, finalmente*; 3º) *a deformação mais não é do que o trabalho produzido pela estrutura atômica constituinte do material ao transportar a força*.

Na Fig. 3.5 infra apresenta-se um esquema que expressa a explicação de Hooke.

Basicamente, para o transporte da força ao longo do corpo, ocorrem, em geral, não mais do que três tipos diferentes de movimentos relativos dos átomos, os quais designamos por: i) trabalho interno esforço normal; ii) trabalho interno esforço transverso; e iii) trabalho interno momento fletor. Estes tipos diferentes de trabalho interno são aquilo que, nesta dissertação, designamos por *funcionamento estrutural*.

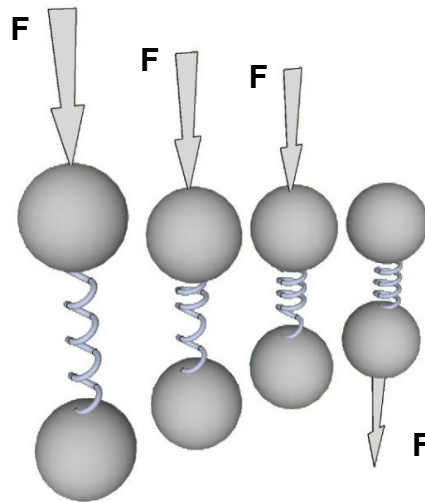


Figura 3.5 – Esquema de deslocamento da força ao longo dos átomos, “o caminhar da força”
(do autor)

Para clarificar o conceito *funcionamento estrutural*, analisemos então a fenomenologia envolvida na tipologia *viga*, representada na Fig. 3.6, infra. Para ajuda na interpretação da fenomenologia envolvida vamos recorrer ao uso do operador *seção transversal S*, de igual modo representada na referida Fig. 3.6.

Vamos supor, por hipótese, que a única força atuante na viga é a força *W*. No apoio da esquerda desenvolve-se, então, uma reação *R*. Dado que esta força possui *braço* relativamente à seção transversal *S*, então, esta reação *roda* em torno da referida seção.

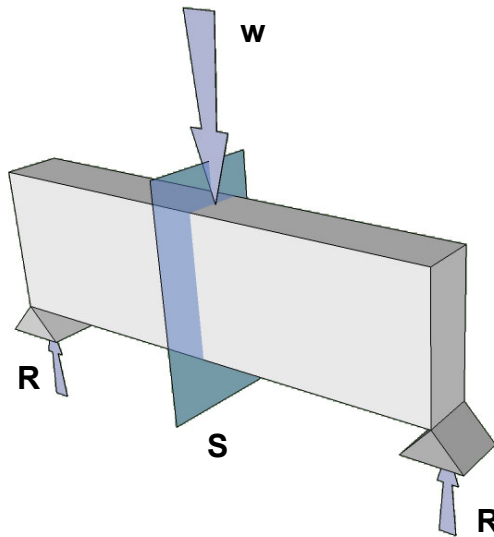


Figura 3.6 – Funcionamento estrutural da viga
(do autor)

Na Estática, denominamos por momento, a rotação de uma força em torno de um ponto, ou plano. Na Fig 3.7, à rotação da reação em torno da seção transversal S designamo-la por *momento externo aplicado* - (M_{ext}), aplicado à viga.

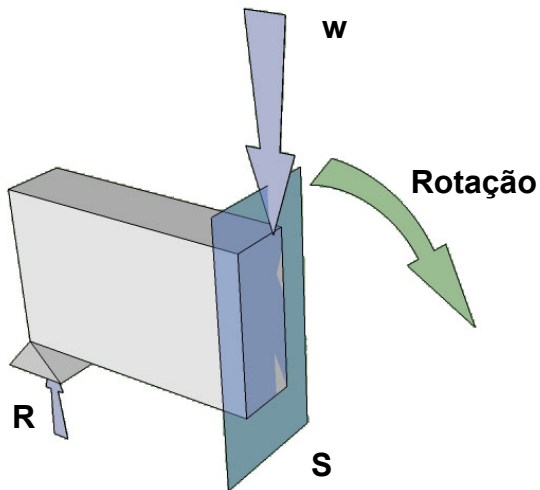


Figura 3.7 – Rotação (Momento Externo Aplicado)
(do autor)

Se não existir qualquer outra adicional rotação contrária, aplicada na seção transversal S , tal, significa que a viga ficará a rodar *ad eternum*. Ora, nós vemos, por simples

observação visual, que as vigas não se movimentam; estão estáticas; sem que ocorra qualquer rotação. Deste modo, facilmente se conclui, que se estão estáticas, sem rodarem, então, necessariamente é porque está a ocorrer uma adicional rotação, que contraria e anula a rotação provocada pela reação R na seção transversal S . A esta rotação, que garante a ausência de movimento por rotação, denominamo-la por *rotação equilibrante* (cfr., Fig. 3.8).

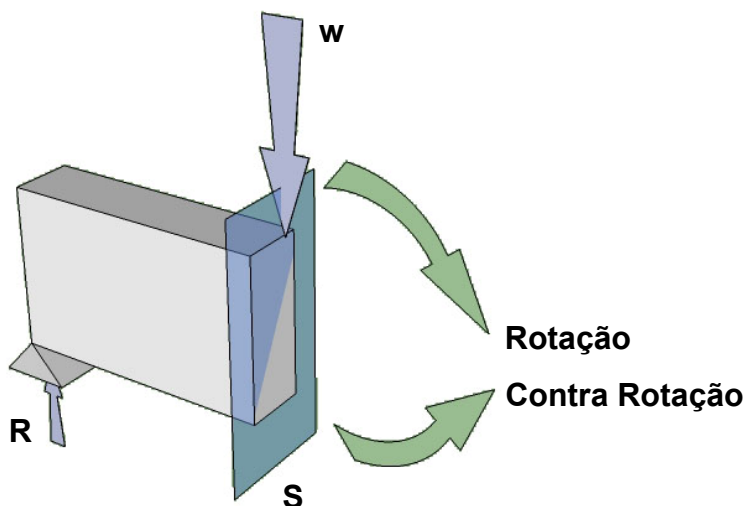


Figura 3.8 – Contra rotação (Momento Equilibrante)
(do autor)

A questão que agora se coloca é: *que entidade é responsável pelo aparecimento desta rotação equilibrante?*

Como só existe a *matéria* de que a viga é feita, então, a entidade que provoca a *rotação equilibrante*, naturalmente, só poderá ser a própria *matéria*. As partículas que a constituem, ou seja, o conjunto dos átomos presentes ao longo da seção transversal S , vão deslocar-se de um modo particular, de modo a produzirem a *rotação equilibrante*, tal como a Fig. 3.7 esquematiza.

Suponhamos, por facilidade de raciocínio, que somente existem duas partículas na seção transversal S ; uma na extremidade superior e outra na parte inferior da seção, tal

como a Fig. 3.7 ilustra. Então, para que ocorra uma rotação por deslocamento destas duas partículas, i.e., geometricamente, para que tal seja possível, obrigatoriamente, uma deslocar-se-á num sentido, e a outra, necessariamente, movimentar-se-á em sentido contrário (cfr., Fig. 3.9). Só assim é possível ocorrer rotação.

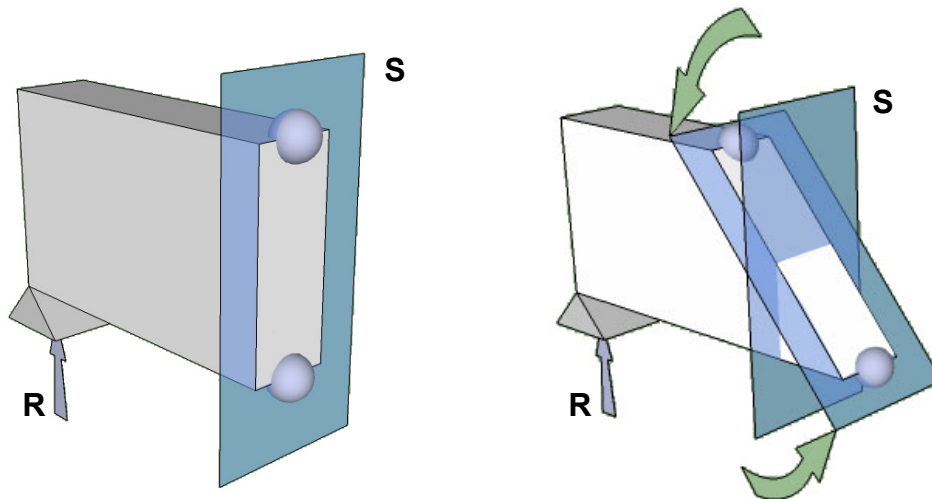


Figura 3.9 – Modelo geométrico de rotação
(do autor)

Deste modo, a partícula superior desloca-se para a esquerda, e a partícula inferior para a direita. Se se movimentam, estão a produzir trabalho. É este o denominado trabalho interno produzido pelas duas partículas com o objetivo de forçarem o “aparecimento” da *rotação equilibrante*. A este modo particular de movimento das partículas chamamos de *momento fletor*. É esta a essência do trabalho interno presente na viga.

Naturalmente, existem muito mais que duas partículas na seção transversal S. No entanto, a fenomenologia ocorrente na globalidade da viga é idêntica à expressa no parágrafo anterior. As partículas situadas na parte superior da viga deslocam-se num sentido, enquanto que as partículas colocadas na parte inferior da viga deslocam-se em sentido contrário, de modo a que se produza a referida (contra)*rotação equilibrante*.

A totalidade do trabalho interno da seção transversal S é o somatório do trabalho produzido pelo conjunto das partículas presentes na seção. A este específico trabalho global denominamo-lo por *trabalho interno momento fletor*. Para compatibilizar os

deslocamentos contrários da parte superior com a inferior, a viga tem necessariamente de *fletir*; daí usar-se o termo *fletor*. Diz-se, então, em linguagem comumente aceita, que a viga se deforma por flexão. Como se perceberá, a Fig. 3.10 infra explicita a fenomenologia envolvida.

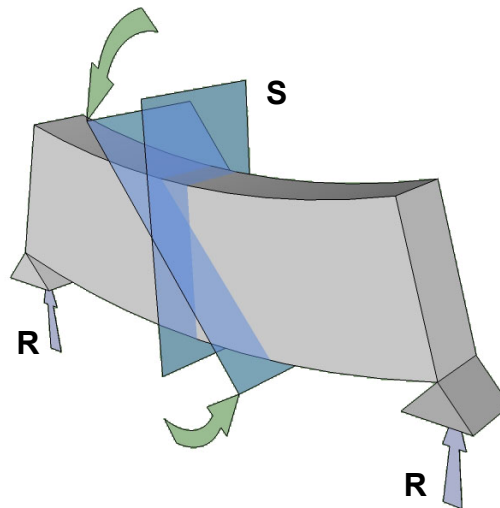


Figura 3.10 – Momento fletor – deformação
(do autor)

Na tipologia *viga* também é produzido o trabalho interno esforço transversal, mas, o principal, o característico, é o trabalho interno momento fletor. Daí, dizer-se que é o momento fletor que caracteriza a essência do *funcionamento estrutural* da tipologia viga.

Em conclusão, o momento fletor é o *funcionamento estrutural* característico da tipologia viga para transportar forças. O *caminho da força* numa viga faz-se essencialmente com produção de momento fletor. É, assim, este, o seu *funcionamento estrutural* característico.

A título de exemplo, ou ilustração, lembremos que na tipologia coluna, o seu *funcionamento estrutural* característico é o trabalho interno esforço normal, tal como na treliça e no quadro, enquanto na tipologia pilar, quando sujeito a torção externa importante, por exemplo aquando de um sismo, o seu *funcionamento estrutural* característico será o trabalho interno momento torsor, a par, naturalmente, dos trabalhos internos esforço normal e momento fletor, que também estão presentes na tipologia pilar.

O *funcionamento estrutural* de cada tipologia mais não é, assim, do que o trabalho interno característico produzido, pela estrutura atômica desta, para transportar uma determinada força até ao apoio, ou apoios. Importa, por conseguinte, ao arquiteto conhecer o funcionamento estrutural das diversas tipologias que tem ao seu dispor, o qual nada mais é do que o denominado catálogo de *tipologias de formas estruturais básicas*. (Morais, 1997)

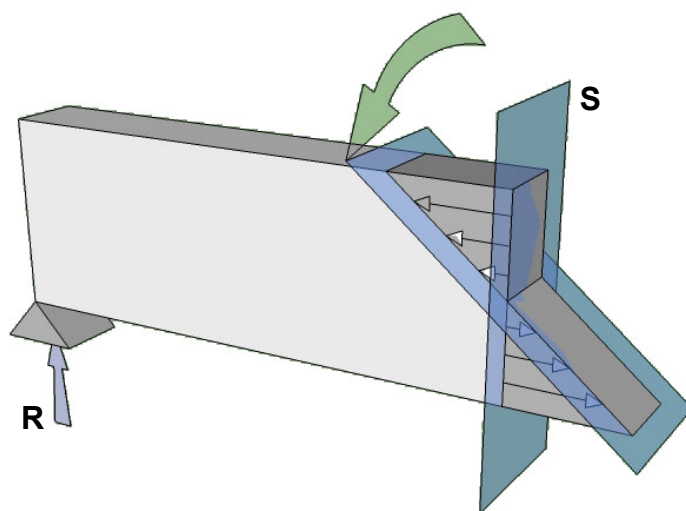


Figura 3.11 – Ineficiência do momento fletor
(do autor)

No caso do trabalho interno momento fletor constatamos, no entanto, da observação da Fig. 3.11 supra, que este trabalho interno é ineficiente, porque nem todas as partículas produzem a mesma quantidade de trabalho. Com efeito, o deslocamento das partículas não é igual em todas elas, pois as partículas situadas nas extremidades superior e inferior deslocam-se mais que as restantes. Tal só pode significar, então que as partículas das extremidades produzem mais trabalho e que as restantes produzem menos trabalho; inclusive, existem partículas que nem produzem qualquer trabalho, conforme se ilustra na Fig. 3.11 supra.

Facilmente se conclui, pois, que se pretendermos criar grandes vãos, então, “*devemos escolher tipologias de formas estruturais onde o trabalho interno momento fletor não esteja presente, ou pelo menos, a sua ação esteja anulada ou diminuída*”. (Morais, 2016: 30)

A necessidade de produzir trabalho interno momento fletor tem uma outra consequência, a ter sempre presente no ato criativo da *forma* arquitetónica, que se prende com o *material* a que se recorre para materializar o edifício.

Conforme se observa na Fig. 3.11, a produção de trabalho interno momento fletor dá origem, em simultâneo, ao aparecimento de compressão e tração. Em regra, compressão na parte superior da viga e tração na sua zona inferior.

Esta constatação é deveras importante. Com o trabalho interno momento fletor temos sempre presente *tração*. Ora, nem todos os materiais têm a capacidade de produzir tração; denominamo-los materiais de comportamento *frágil*. Sempre que usamos este tipo de materiais, o trabalho interno momento fletor não pode estar presente, ou, então, terá de ser anulado mediante um processo qualquer. Os romanos recorriam à colocação de material junto do arranque dos arcos. A arquitetura românica engrossava as paredes. No gótico inventaram a estatuária. Em todos estes processos a variável determinante é o peso do material que anula a tração que o momento fletor carrega, devido à geometria circular. Modernamente recorre-se ao pré-esforço para anular a tração.

Assim, com muitos materiais, há determinadas tipologias de *formas estruturais básicas* a que não se pode recorrer para materializar a estrutura por causa da tração. Existe aqui uma trilogia inter-relacional entre vão vencido – material – forma (cfr., Fig. 3.12).

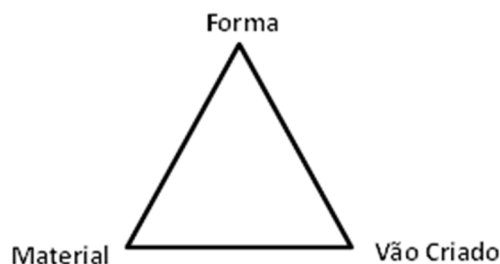


Figura 3.12 – Tríade relacional de forma/material/vão livre
(Gonzales “*Geometrias da arquitectura de terra*”, 2006: 36)

Esta limitação da *tração* ocorre com a alvenaria. Dada a sua incapacidade em produzir tração, então, não pode recorrer-se ao uso das tipologias *viga* ou *laje*, pois nestas, o

funcionamento estrutural assenta primordialmente na produção de trabalho interno momento fletor, que, como vimos, carrega *tração*. Esta incapacidade da alvenaria determinou o aparecimento do arco parabólico e da abóbada parabólica, pois estas tipologias formais já não produzem trabalho interno momento fletor para a ação gravidade.

Repare-se que a curva sem tração é a parabólica, ou próxima desta geometria, donde se conclui que, potencialmente, na curva circular temos *tração*.



Figura 3.13 – Estação de serviço, Heinz Isler, Deitingen, Suíça, 1969
(“Descobre ideias sobre Asas” Heinz Isler, 1969)



Figura 3.14 – Abóbada cilíndrica, da estação de serviço, Eládio Diest, Salto, Uruguai, 1955
(“Descobre ideias sobre Asas” Eládio Dieste, n.d.)

Em consequência, a superfície curva com geometria próxima do arco parabólico apresenta esta grande qualidade, decorrente do seu *funcionamento estrutural*, a de não produzir trabalho interno momento fletor para a ação da gravidade. Se não há momento fletor, tal significa que o trabalho interno presente é o esforço normal, donde se conclui que a geometria da curva parabólica é uma *forma* eficiente e, por conseguinte, esbelta. Edificações com este tipo de geometrias constroem-se com espessuras menores, daí serem as indicadas sempre que pretendemos edifícios de grande vão, com grande espaço livre.

No planeta Terra todos os edifícios estão sujeitos à *ação* da gravidade. É esta a principal ação sobre os edifícios, a par da ação sísmica, aquando da ocorrência de terremotos. Modelamos esta *ação* da gravidade através do conceito *força* inventado por Hooke e Newton.

No nosso modelo concetual explicativo do funcionamento de uma estrutura, as *forças* que representam e modelam a *ação* gravidade vão ser transportadas através da *estrutura* do edifício até ao terreno de fundação. É este o grande conceito doutrinário que a Arquitetura desenvolveu, como ferramenta concetual da sua propriedade que nos dá uma explicação cognitiva assaz simples e muito facilmente entendível. O modo como se processa este transporte, vimos acima, é o denominado *funcionamento estrutural*.

O transporte das forças contempla três momentos distintos, *I*) o aparecimento da *força* i.e., a carga; *II*) o transporte da *força* ao longo da estrutura; e, por fim, *III*) a descarga Na Fig. 3.15 infra esquematiza-se este *caminho da força* ao longo do edifício e da sua forma estrutural. Há muitos edifícios que não possuem uma estrutura, mas o transporte da força processa-se na mesma, mesmo sem estrutura, pelo que em todos os edifícios existe funcionamento estrutural da *força* no solo.



Figura 3.15 – Ciclo de transporte da força ao longo da peça arquitetónica
(do autor)

O aparecimento das diversas forças, devidas às ações ocorrentes no edifício, desencadeia de imediato o seu transporte. No caso da ação gravítica, trata-se de um fluxo contínuo e constante ao longo da vida da obra.

Como em qualquer transporte, existe um *combustível* que assume a responsabilidade de realizar esse transporte interno da *força*. No caso do *funcionamento da estrutura*, vimos que o “combustível” para o transporte da *força* é o trabalho realizado pela estrutura atômica do material.

Concluimos assim que o *funcionamento estrutural* mais não é que o trabalho interno ou trabalhos internos produzidos pela estrutura atômica do material para *transportar a força* ao longo da estrutura. Podemos sistematizar e concluir que os diversos trabalhos internos mais não são que os diferentes e diversos modos de transporte da força que cada configuração formal utiliza.

Este *caminhar da força* é determinante para a compreensão do funcionamento do sistema estrutural. O transporte da força decorre da configuração da *forma estrutural* e dos *caminhos* que esta disponibiliza às forças, estando na base de qualquer estratégia de escolha do funcionamento estrutural. Relembremos que o *funcionamento estrutural* está associado à escolha da tipologia de forma estrutural básica.

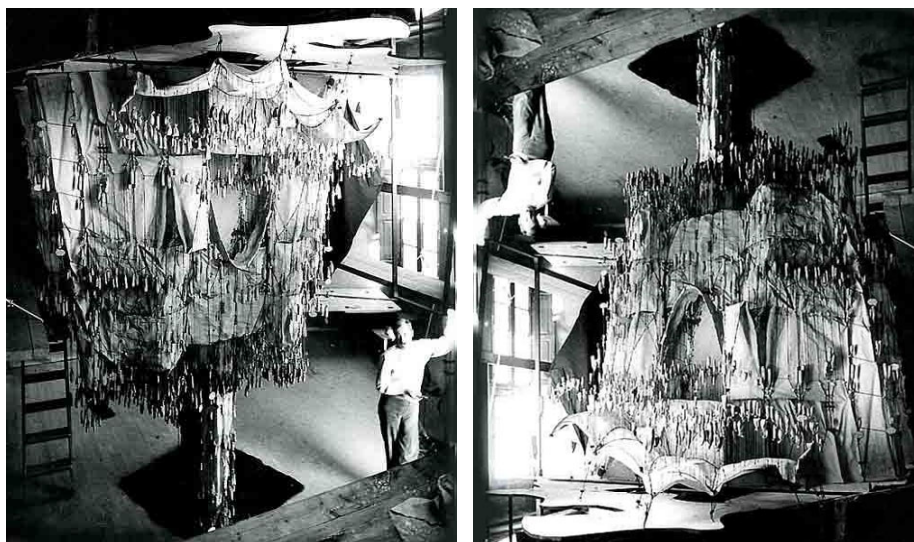


Figura 3.16 – Processo conceptual em que o espaço dialoga com a estrutura, igreja colonia Güell, Gaudí, Barcelona, Catalunha, 1898
(“A Osteologia na arquitectura de Gaudí”, 2014)

A gestão da direção da força relativamente à direção do eixo da *forma estrutural* não constitui um óbice na criação arquitetónica do *projeto*, pelo contrário, é uma oportunidade concetual para a manipulação formal da peça arquitetónica. Dominando este processo cognitivo, o arquiteto adquire uma ferramenta metodológica que lhe permite exponenciar a sua criatividade, alcançando patamares de dimensão expressiva, que só estão ao alcance do arquiteto amadurecido pelo *conhecimento* e *saber*. Gaudí no séc. XIX e Calatrava, Renzo Piano ou Eric Miralles no tempo presente são exemplos paradigmáticos desta postura de conhecimento e saber, e enquadram com clareza o papel que a tecnologia enquanto conhecimento representa para o *Projeto Integrado* (Fig. 3.16). (Moraes, 2016: 323)⁷

Em última análise, a compreensão do fenómeno estrutural resulta da manipulação formal da matéria (a estrutura atómica do material), portanto, decorre da geometria, e das implicações daí decorrentes no denominado funcionamento estrutural, o *modo de transporte solicitado à estrutura atómica*. Este conhecimento e saber inerente ao funcionamento estrutural e aos modos diferentes de transportar a força fornecem um substrato sólido para a gestão e ideação da forma arquitetónica, exponenciando a expressão formal do arquiteto.

A configuração do objeto arquitetónico e as *direções* formais por ele geradas, ao nível dos eixos característicos, resultam determinantes para avaliar o respetivo grau de eficiência e rentabilidade, como veremos mais à frente.

Sempre que a *forma* enquadra no seu seio a direção da força a transportar, então, a *forma* gerada adquire uma grande eficiência ao nível do funcionamento estrutural, pois não será utilizado o modo de transporte trabalho interno momento fletor, o qual, como vimos, é ineficiente. Este é o “*segredo*” da gestão e manipulação da forma para o domínio e capacitação da criação de formas expressivas e imponentes na criação de espaços de grande vão. Os supracitados arquitetos, Gaudí, Dieste e Candela, entre outros, dominavam este segredo com extraordinária sabedoria, cujo resultado estético se ilustra nas Fig. 3.13, 3.14, 3.16 e 3.17.

⁷ Projeto Integrado é definido por Moraes como a relação entre a dimensão estrutural e a dimensão estética presente a conceção da arquitetura.



Figura 3.17 – Restaurante Los Manantiales, Felix Candela, Cidade do México, México, 1958
(Felix Candela, n.d.)

Dominar o “*caminho da força*” revela-se determinante para o resultado plástico e estético da peça arquitetônica. O *pilar inclinado* da arquitetura de Gaudí e o *quadro* estrutural das esculturas estruturais de Calatrava são resultado do amadurecimento que estes arquitetos granjearam no seu processo metodológico e cognitivo, de aprendizagem do conhecimento sobre a interação entre forma arquitetônica e forma estrutural, ditada pela manipulação interdependente entre as *direções* dos eixos da forma estrutural e da força transportada por esta.

Os princípios metodológicos e operativos defendidos nesta tese advogam a necessidade de integrar este domínio científico do conhecimento na formação do arquiteto, devendo, pois, considerar-se a criação na Academia de um corpo disciplinar específico do conhecimento operativo suscitado pela Fenomenologia Estrutural, propriedade da Arquitetura. Um domínio científico dominado como se defende aqui, pelo *caminho da força, na conceção da forma arquitetônica*.

Este ramo do saber será necessariamente distinto e diverso do cálculo e do dimensionamento de estruturas ensinado nas escolas de engenharia civil. À engenharia civil, enquanto corpo disciplinar que aborda as questões do cálculo e do dimensionamento, a comunidade não pede, e não espera, expressão formal do seu trabalho, nem a valia (ou a validação) estética e ética da forma. A esta disciplina, exige-se apenas a segurança no cálculo e no dimensionamento, para que a comunidade tenha confiança na solidez da obra executada. É este o requisito que a sociedade pede (e deve pedir) ao engenheiro civil (e que este *deve* dar).

A matriz formativa do engenheiro é fundada no valor do rigor do cálculo matemático e este enquadramento mental e cognitivo não privilegia a inovação ou a plasticidade das formas, pelo contrário, cerceia e condiciona a criatividade formal (Moraes, 2016: 330). O engenheiro foi treinado no domínio de determinada teoria de cálculo e dimensionamento, e repete e emprega esta teoria em todos os cálculos que realiza. Não há qualquer inovação de cálculo para cálculo, porque a teoria empregue se mantém a mesma. A inovação e a criatividade formal não são, assim, o foco da atenção do engenheiro, ou o resultado do seu trabalho.

Arquiteto e engenheiro têm focos e atitudes diversas perante a atividade da ideação e criação da forma, embora possam confluir nalguns aspetos.

Uma resposta puramente estrutural, às ações gravitacionais, resultaria numa peça linear, com forma direta aos pontos de apoio, em regra, as fundações, onde se processa e efetua a descarga da correspondente força no solo. É o que se passa com o projeto de pontes. A graça e a harmonia estética estão por regra ausentes neste tipo de obras. Calatrava rompeu com este *status quo* porque teve uma formação inicial de base em arquitetura, pois somente após ter obtido o curso de arquiteto estudou e se doutorou em engenharia de estruturas.

Naturalmente, este tipo de conceção da forma, onde prevalece a teoria do cálculo, é redutor da Arquitetura, até porque como se disse, é apenas nela confluyente.

O arquiteto pretende criar formas compositivas com plástica de maior valia. Este desejo do arquiteto implica um saber, específico da Arquitetura, ao nível da ideação de formas onde a direção do fluxo da força sofre desvios, recorrendo a outras direções no seu caminhar até à fundação, resultante do espaço arquitetónico produzido e desejado pelo arquiteto. O caminho da força interdepende e interage com a *forma* arquitetónica.

A mudança de *direção* da força é assim **o operador criativo básico**, de uso cognitivo pelo arquiteto, para a *manipulação* da forma arquitetónica. A forma estrutural não garante só a segurança perseguida pelo engenheiro, mas desempenha um outro papel, o de definir e criar o espaço arquitetónico. Estamos no campo específico da criação do espaço, o terreno próprio do arquiteto. Aqui, o termo *manipulação* expressa a ideação de *cenário de formas possíveis*, i.e., o *form-finding*. Ou seja, o formalizar de vários caminhos possíveis para o caminhar da força até às fundações.

No final deste processo de criação cognitiva, o arquiteto escolhe um dos caminhos por si ideados, *maxime*, a *forma estrutural* definida e criada no projeto da peça arquitetônica. Esta atividade não é engenharia civil; trata-se do campo da ideação da arquitetura, potenciado pela criatividade e metodologia projetual utilizada pelo arquiteto.

No caso da superfície curva, a forma, porque é, neste caso, tridimensional, oferece à força vários caminhos. Esta possibilidade de *vários* caminhos, redistribui a força a transportar por cada um dos caminhos disponíveis para o transporte, ou seja, divide-a, pelo que, em cada caminho, existe uma força menor a transportar. O trabalho interno produzido pela estrutura atômica no transporte em cada caminho será assim menor, donde a *espessura* da forma curva advirá inferior. Em consequência, a forma curva será muito mais esbelta que uma configuração linear. É esta a grande vantagem da superfície curva, sobretudo, a de dupla curvatura.

Nesta tese intenta-se chamar a atenção para as potencialidades estruturais da forma curva, mormente a de dupla curvatura. Esta tipologia formal é uma das soluções mais potentes no plano da eficiência estrutural, disponibilizando soluções esbeltas ao serviço da Arquitetura.

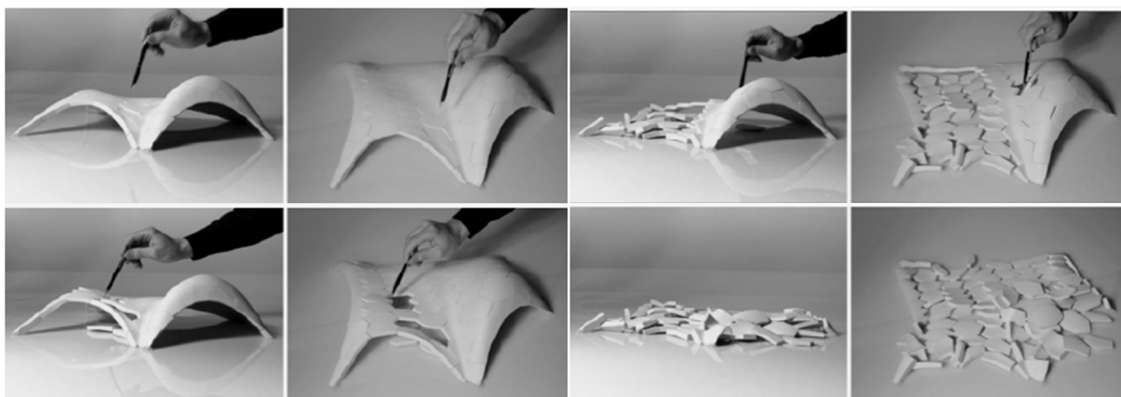


Figura 3.18 – Estudo do processo de colapso da abóbada em MLK Jr. Park Vault (escala 1:33), 2012
(“Innovating structural masonry - MLK Jr. Park Stone Vault”, 2012)

A estética mas também a ética inerente à forma curva não advém só do seu desenho geométrico, mais ou menos harmonioso; decorre essencialmente da sua reduzida

espessura que o seu particular funcionamento lhe garante, ao fornecer vários caminhos para a força a transportar. Quantos mais caminhos, menor o valor de cada força em cada particular caminho, donde a menor espessura que determina a esbelteza e a plástica da forma curva.

A sequência de queda da superfície da abóbada MLK Jr. revela que apesar de serem retiradas algumas peças à abóbada, esta não entra de imediato em colapso, tal deve-se ao facto da forma permitir que a força encontre novos caminhos, colapsando apenas quando a força não consegue um fluxo eficaz ao longo da forma.

O conhecimento do mecanismo de redistribuição das forças é o princípio basilar na condução da força no interior da forma estrutural curva. Deste modo, as cargas (forças) resultantes da ação gravitacional “*caminham*” de um modo contínuo e sem interrupção para a fundação, onde finalmente se transferem para o solo.

Na conceção das formas, importa que o arquiteto adquira o conhecimento de que as descontinuidades e os afunilamentos, existentes ao longo do trajeto das forças, acarretam uma penalização no funcionamento estrutural da matéria, pelo que a eficiência resulta menor, e, conseqüentemente, a espessura advirá maior com penalização da esbelteza e da plástica.

Ocorre o denominado fenómeno da concentração de tensões por força do afunilamento e da alteração algo brusca da direção do eixo da forma estrutural. Algo semelhante ao que ocorre numa estrada aquando do corte de uma das faixas de rodagem; o tráfego rodoviário deixa de se processar de modo harmonioso e a velocidade de circulação diminui, aumentando a concentração de veículos.

No plano funcional, a razão de ser de uma edificação decorre do desejo dos humanos em dispor de espaço coberto, a chamada *edificação*. A criação de vão gera um conflito de *direções* e, já o sabemos, a *manipulação da direção* é o operador cognitivo para a criação da forma do espaço desejado pelo arquiteto.

O vão apresenta uma direção horizontal, decorrente do modo natural de deslocamento do Homem, enquanto a força da gravidade tem uma direção vertical. Esta dualidade de direções é o conflito que o conhecimento do arquiteto encerra e resolve e que, através da sua criatividade o leva até à ideação formal. E o mesmo acontece com a necessidade de expandir verticalmente o espaço, gerando pé direito compatível com o *habitar*. Este

requisito apresenta uma direção vertical que se contrapõe à ação horizontal resultante do vento e do sismo.

A ideação da forma estrutural pelo arquiteto tem como objetivo a manipulação e compatibilização destas diversas direções, a da forma estrutural e a da força que caminha, mediante a respetiva exploração racional e espacial por parte do arquiteto.

O recurso a superfícies que distribuem de um modo uniforme a força, alcançando, assim, baixos níveis de tensão (força menor nos vários caminhos disponibilizados pela superfície curva), define o particular funcionamento das tipologias estruturais curvas, como são os arcos, as abóbadas e as cascas, mas também tipologias em lâmina, como são as superfícies plissadas.

Existem também tipologias de formas estruturais básicas que detêm um particular funcionamento, possibilitado por possuírem a propriedade da *flexibilidade*. Estas formas funcionam sempre em estado de tração simples, portanto, só com produção de trabalho interno esforço normal de tração, como são por exemplo as tipologias de membrana e cabo.

A articulação de vários componentes construtivos, capazes de atuar através de tração e compressão, distribuindo a força em diferentes direções, resulta do uso do denominado “efeito do triângulo” (Morais, 1997: 33). Esta configuração permite configurar as tipologias de quadro e a sua variante de treliça. Este sistema, por vezes denominado de vetor-ativo, possibilita a conceção de formas mais evoluídas no plano da composição, como são as construções *tensegrity* (Fig. 3.19 infra).

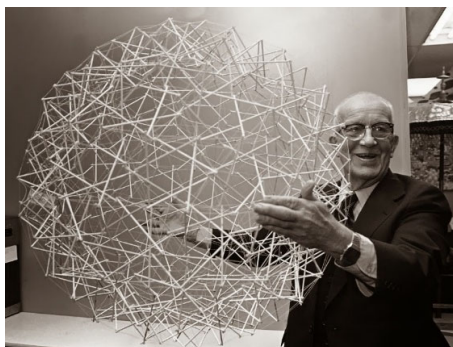


Figura 3.19 – Modelo de Tensegrity, Buckminster Fuller
(Tensegrity Structures: What They Are and What They Can Be, 2003)

O conhecimento dos métodos de funcionamento estrutural e das tipologias estruturais básicas permite ao projetista gerir e gerar a forma estrutural e consequentemente criar espaço.

Na Arquitetura, a dimensão estrutural é uma parte fundamental da sua realização, sendo o instrumento determinante para gerar a forma que engloba, define e suporta o espaço. É o elemento primordial na definição da Arquitetura. Não há Arquitetura sem que a função estrutural esteja garantida, por muito intangível que seja a sua percepção. Por esta razão, a forma estrutural torna-se um veículo essencial na criação do universo espacial do homem.

A forma estrutural, na sua relação com a forma arquitetónica, define e estabelece a dialética entre a direção da força e a direção do eixo da forma estrutural. Esta dialética potência um campo infinito para a criatividade formal do arquiteto. Cabe a este dominar este conhecimento, construindo saber, para alcançar e criar formas arquitetónicas eficientes e de estética superior. Abre-se um campo largo, onde a forma estrutural ascende e transporta valor plástico e não apenas funcional.

Os objetos materializados pela natureza ou pelo Homem, manifestam-se pela sua forma particular. *“A forma é a definição tridimensional da matéria...” resultando “da distribuição física do material e...” definindo “o espaço”.* (FAMIH 1990, material didático)⁸

As formas têm um fito funcional, qual seja o de albergar o programa arquitetónico e, deste modo, cumprem o desígnio, que esteve presente na conceção e vontade inicial do arquiteto e do dono de obra. A sua função específica está ancorada à sua particular forma, justificando-a. Assim, uma forma que esteja “debilitada”, implica que a sua função estará também posta em causa.

A preservação da forma é uma condição basilar para o desempenho da sua função espaço-funcional; o foco primordial do exercício da Arquitetura. A praxis metodológica corrente não reflete muitas vezes a observância destes princípios geradores da forma.

A síntese formal é apenas o resultado de uma gestão espacial da forma, a qual é desenhada para servir um programa e uma função particulares. Esta metodologia não

⁸ Material Didático do curso de Arquitetura e Urbanismo das Faculdades Metodista Integradas Izabela Hendrix na disciplina de Plástica, 1990.

incorpora nas suas premissas os desígnios construtivos da geração da forma, nem atende de modo integrado às necessidades de estabilidade. Esta é uma das razões porque nesta dissertação defendemos a tese que a *metodologia de projeto* deve ser revista e deve integrar o domínio e conhecimento do funcionamento estrutural das tipologias de formas estruturais básicas; é esta a causa e a função da fenomenologia estrutural, nela consistindo o valor do *projeto integrado*.

As formas decorrentes de uma abordagem funcional revelam-se desajustadas e, não poucas vezes, contrárias ao fluxo natural da força, penalizando assim o seu desempenho. Neste caso, o *caminho da força* não ajustado à direção do eixo da forma que a transporta implica a produção de trabalho interno ineficiente, ou seja, o momento fletor.

A lógica que pauta a sua geração não contempla o controlo do caminhar da força e do seu fluxo ao longo da forma, sendo por isso uma abordagem meramente “em função de um programa” sem a devida contextualização tecnológica e, por isso incapaz de dar uma resposta *integrada* e otimizada à ideação formal.

Deste modo, ela contrariará o ato de síntese que é a arquitetura, tal como expresso há milénios por Marcus Vitrúvio através da famosa tríade do *firmitas, utilitas e venustas* (estrutura, função e beleza).

3.2 Força – forma – eficiência

Como vimos atrás, para que a força seja transportada, a estrutura atómica do material da forma construtiva produz trabalho interno, que fenomenologicamente, mais não é que o movimento dos átomos a aproximarem-se, ou a afastarem-se, uns dos outros, consoante o sentido da força a transportar. O tipo de trabalho interno que se produz num elemento construtivo (esforço normal, esforço transversal e momento fletor) depende da relação que se estabelece entre a direção do eixo da peça e a direção da força que esta peça transporta.

Uma força transportada com direção coincidente com o eixo longitudinal da forma origina um trabalho interno-esforço normal por parte da estrutura atómica do material (i). Neste tipo de trabalho interno (esforço normal), os átomos produzem todos a mesma quantidade de trabalho, pelo que este tipo de trabalho interno é o mais eficiente. Numa

seção transversal S, todos os átomos se deslocam na mesma quantidade, aproximando-se ou afastando-se entre si, consoante o sentido da força. Este deslocamento de aproximação ou afastamento de cada átomo é a denominada *deformação* do material.

Para cada material, cada átomo tem um máximo de deslocamento possível. Quando um átomo atinge este máximo, ocorre a rutura do material. A engenharia chama a este máximo, a tensão de rutura do material. Naturalmente, cada material tem o seu específico deslocamento máximo, ou seja, o seu deslocamento de rutura.

Note-se, que, fenomenologicamente, a rutura está ligada à força parcelar que cada átomo tem de transportar; se esta força parcelar origina no átomo um deslocamento superior ao que a ligação entre átomos deste particular material consegue suportar, então, ocorre a separação entre átomos, ou seja, a rutura.

Na figura 3.20 aproveita-se para apresentar a visão da engenharia civil do conceito de tensão de rutura. Esta mais não é do que o valor da força transportada a dividir pela área da seção transversal S da forma estrutural.

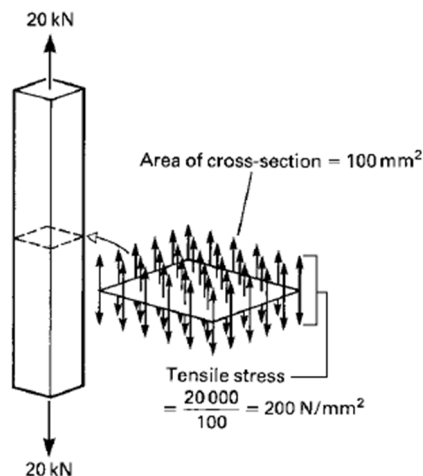


Figura 3.20 – Esquema do trabalho Interno esforço normal
(Macdonald, 2001:135)

Conforme vimos atrás, se uma força a transportar tem direção não coincidente com a direção do eixo da forma que a transporta, então, ocorre uma rotação, pelo que a

estrutura atômica pode ter de produzir o correspondente trabalho interno de momento fletor.

O valor do momento desta rotação é igual à multiplicação da força transportada pelo seu braço, sendo este a distância medida na perpendicular entre o ponto de rotação e a direção da força, ou seja, o raio da rotação circular.

Vimos que, no caso do trabalho interno-momento fletor, os átomos numa seção transversal S não se deslocam todos da mesma quantidade, ou seja, os átomos produzem trabalho interno diferente. Esta é a razão da baixa eficiência das *formas estruturais* submetidas à flexão, concretamente daquelas que têm de produzir momento fletor. Note-se que se tratam de formas lineares, onde a viga é o exemplo paradigmático.

Sabemos que o material existente a meia altura da seção transversal, zona denominada comumente pelos engenheiros de “linha neutra”, não se deforma, ou seja, o material aí colocado não produz qualquer trabalho interno momento fletor, daí a ineficiência, com o conseqüente aumento da volumetria e do peso.

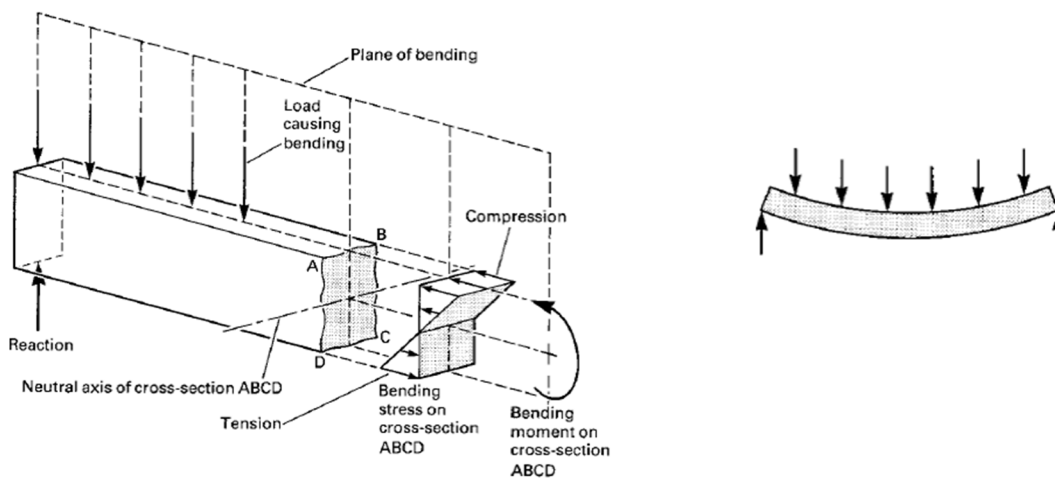


Figura 3.21 – Esquema do trabalho interno Momento Fletor
(Macdonald, 2001:135)

Importa reter o seguinte princípio basilar para a criação de *formas* eficientes. Trata-se de princípio fundado num raciocínio muito simples, mas que traduz o que se passa no interior da matéria; referimo-nos à estrutura atômica do material.

Quanto maior for o número de trabalhos internos presentes na forma estrutural, *maior* será a sua espessura. Com efeito, se somente for solicitado um trabalho interno à *forma*, a espessura será uma. Se lhe forem solicitados dois trabalhos internos, a espessura terá de ser maior, porque será necessário adicionar átomos para produzirem mais um trabalho interno. Se aumentar para três o número de trabalhos internos, a espessura ainda terá de ser maior, porque temos que lá colocar mais átomos para produzirem por sua vez, mais um trabalho interno.

Deste raciocínio muito simples decorre um princípio básico para o desenho de *formas* eficientes e esbeltas: *devemos desenhar formas onde o número de trabalhos internos pedidos seja somente de um e, este, seja sempre trabalho interno esforço normal*.

A eficiência formal está assim associada ao número de trabalhos internos presentes e à existência ou não de trabalho interno-momento fletor. Só que, não existindo a necessidade de produzir momento fletor, então, em regra, o trabalho interno esforço transversal também não estará presente, pelo que só teremos presente um trabalho interno, o de esforço normal. Fugir ao trabalho interno momento fletor é assim o invariante criativo para gerar formas eficientes e esbeltas.

O domínio destes conceitos e princípios básicos permite ao arquiteto o desenvolvimento e escolha consciente de formas eficientes, com menores dimensões para a geometria da secção transversal, logo de menor espessura e volumetria. Deste modo, não só é possível otimizar o seu desempenho, mas, sobretudo alcançarem-se desenhos de formas de maior valor estético, associados à esbelteza assim granjeada.

A eficiência e a plástica da forma podem ser ainda elevadas tirando partido da ausência de trabalho na zona de meia altura da espessura. Com efeito, se nesta zona o material não produz trabalho, então, pode ser retirado. Ao retirar este material da meia altura reduz-se não só o peso, como se proporciona a instalação de aberturas na peça arquitetónica, potenciando a sua dinâmica formal. A figura 3.22 infra apresenta um exemplo desta dinâmica.

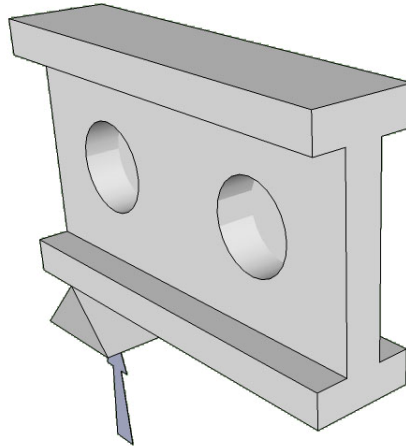


Figura 3.22 – Dinâmica formal
(do autor)

Pelo facto de no trabalho interno momento fletor se gerarem em simultâneo compressão e tração, então, existe uma adicional exigência na escolha do material a utilizar na materialização da peça arquitetónica, pois temos de usar uma materialidade, simples ou compósita, que acomode tração e compressão em simultâneo. Nem todos os materiais possuem a possibilidade de produzirem tração e compressão. A capacidade de os materiais produzirem em igual quantidade tração e compressão é rara na natureza, como são o caso da pedra, da argamassa e do betão do ferro fundido, entre outros. Estes materiais têm muito reduzida capacidade de produzir tração. Existe, então, a necessidade de produção industrial de materiais capazes de responder a esta desigualdade comportamental à tração.

A ideação de formas com produção de momento fletor obriga o arquiteto a adotar materiais que suplantem a dificuldade da tração. O betão armado, o aço e as formas compósitas com aço ou fibras poliméricas são a resposta tecnológica para a criação deste tipo de formas pelo arquiteto.

A compreensão fenomenológica da presença de momento fletor no comportamento da forma é fundamental para a geração da forma funcional, *esbelta*. O trabalho interno esforço normal com a sua particular deformação axial revela uma maior eficiência, comparativamente com o trabalho interno momento fletor, com a sua peculiar deformação por flexão.

As deformações axiais e as flexões são as mais comuns nos sistemas estruturais utilizados na Arquitetura.

As formas com trabalho interno momento fletor são as mais difíceis de gerir de modo eficiente e esbelto, visto que se existe momento fletor, subsiste igualmente o trabalho interno esforço transversal, ou seja, temos logo dois trabalhos internos presentes, o que determina maior espessura, e como o momento fletor é altamente ineficiente, então, a espessura resulta ainda maior. Dada a tração presente com o fletor, a par da compressão, e à espessura elevada provocada pela sua ineficiência, advém consequentemente uma situação exigente para o material a utilizar na manifestação da forma, com aumento da quantidade de material a empregar, logo mais cara.

Deste modo, poder-se-á concluir que uma prática consciente da Arquitetura levará em conta estes fenómenos, incorporando-os na síntese produzida e na metodologia de projeto a utilizar pelo arquiteto.

A *forma* é a variável que determina se temos presente a produção de momento fletor. Noutro registo, depende da *forma* ideada termos ou não presente o trabalho interno momento fletor. O determinante é a *forma*. Esta variável é por excelência o território de atuação do arquiteto, qual seja, *a criação de formas*.

Deter o conhecimento relativo ao funcionamento estrutural das tipologias de formas estruturais básicas é, deste modo, determinante para o sucesso da atividade do arquiteto.

3.2.1. Geometria - disciplina operativa da forma

A forma estrutura-se e organiza-se espacialmente; Assim, o modo “como uma estrutura se organiza” materialmente no espaço, i.e., a sua distribuição “está intimamente ligada à sua estabilidade e ao seu desempenho” estruturais. Em função da configuração geométrica da estrutura, fica definida a sua eficiência estrutural ao longo da respetiva vida útil.

Ao analisarmos o conceito de *forma*, numa visão geométrica podemos dizer que a *forma* é o “*limite ou estrutura visível de um corpo; a... “realização material de toda construção*

manifestada através das múltiplas combinações obtidas pelas linhas, superfícies e volumes". (FAMIH, 1990, material didático)

Para Ronei Filgueiras, "o desempenho estrutural de um elemento físico" resulta primeiramente da sua geometria, ou seja: *"quanto maior a riqueza geométrica da superfície, tanto mais plenamente serão satisfeitas essas condições"*.⁹

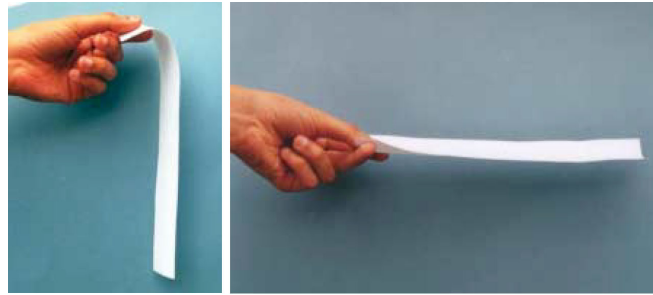


Figura 3.23 – Ação da gravidade sobre uma tira de papel

(Firmo Célio, 2003)

Ação da gravidade sobre a tira plana de papel (figura da esquerda). Ação da força da gravidade sobre a tira de papel enrijecida pela curvatura (figura da direita).

Um exemplo que ilustra este fenómeno, ocorre quando posicionamos uma tira de papel com forma linear na sua posição horizontal inicial. Esta vai de imediato fletir sob a ação da gravidade (figura 3.23, esquerda). Este fenómeno acontece porque a tira de papel tem reduzida espessura. Caso seja feita uma pequena alteração geométrica à mesma tira, através de uma curva ou um vinco ao longo do seu eixo longitudinal, aumenta-se a inércia da peça, i.e., esta ganha a rigidez suficiente para se manter na horizontal, sendo ainda capaz de suportar o seu peso próprio e, ainda, alguma carga extra.

Neste exemplo, com o mesmo tipo e quantidade de material, o desempenho estrutural alterou-se de modo significativo fruto de uma operação geométrica; a geometria é uma ferramenta conceptual de grande alcance.

⁹ FILGUERAS. Ronei Lombardi - Membranas. Belo Horizonte: Arbor Engenharia, s.d.

A disposição geométrica da matéria predispõe à rigidez de qualquer estrutura, sendo possível a otimização de qualquer material através da sua definição geométrica ou formal, dai a enorme importância da fase de conceção do sistema estrutural.

As formas estruturais em Arquitetura resultam de um processo concetual que tem como objetivo primeiro a criação de uma geometria capaz de dar resposta à necessidade de redistribuir as forças nas direções oferecidas pela forma, recorrendo a diferentes estados de equilíbrio.

A geometria das tipologias estruturais básicas são o suporte operativo que permite definir e fundar com rigor uma gramática formal, associada ao funcionamento estrutural. O carácter abstrato da geometria, definidor de linhas, superfícies e volumes, apresenta-se como um processo operativo para compreensão e definição do funcionamento estrutural das formas utilizadas na Arquitetura.

A geometria é um veículo para a conceção das formas, servindo não só como base para a definição dos seus pressupostos, como também para a comunicação, verificação e otimização dos objetos. Não se constitui como um obstáculo à criatividade, por estar sujeita a uma lógica matemática que não permite devaneios inconsistentes, é ao invés, uma oportunidade para a libertação da criatividade, apresentando um elevado potencial poético e expressivo.

As formas estruturais não têm uma vinculação geométrica específica, muito menos a um sistema estrutural ou um tipo estrutural.

A geometria das formas estruturais assume-se como um substrato capaz de albergar e potenciar a criatividade, estimulando a transgressão mecânica e permitindo a rutura concetual no plano formal, no que acaba por se transformar no *território puro da ação plástica do arquiteto*.

O conhecimento e estudo das formas estruturais existentes na natureza confere uma nova perspetiva à compreensão e manipulação da geometria das formas estruturais, estimulando e sancionando o processo concetual de novas formas.

O ovo revela um funcionamento estrutural baseado nos princípios do equilíbrio de forças e da geometria da forma; a sua resistência não decorre só da capacidade do material, que o constitui, resistir às tensões.

Os princípios veiculados por este objeto criado pela natureza, propõem-nos um paradigma estrutural que recusa um modelo concetual baseado na tensão de cedência ou na tensão de rutura dos materiais; esta última lógica concetual remete-nos para paradigmas conceptuais mais limitados e focados no cálculo, bem como para tipologias estruturais menos eficientes e mais exigentes para o material.



Figura 3. 24 – Aplicação de forças nos polos de um ovo
(A Sua Aula de Matemática, 2017)

A aplicação de uma força nos polos de um ovo, não produz com facilidade a sua rutura. Tal facto, deve-se ao ângulo da curvatura do ovo, nessa zona, que faz com que a força empregue produza essencialmente esforço normal devido à geometria em curva, que nessa particular zona, oferece vários caminhos à força, o que diminui a tensão. Trata-se de uma forma estrutural básica em casca. Nesta zona, o momento fletor é nulo.

Já a aplicação lateral de uma força produz facilmente a rutura do ovo. Agora, a força aplicada pela mão é perpendicular ao ovo, ou seja, à direção do eixo da casca, pelo que o material constituinte do ovo produz momento fletor. Atrás, vimos que este trabalho interno é altamente ineficiente, logo, nesta zona, o ovo exige maior espessura (e que o ovo não tem) donde consequentemente sobrevém a rutura, por tração desenvolvida pelo momento fletor.

O ovo é um exemplo de um objeto natural que expressa os diferentes comportamentos do ovo é um exemplo de um objeto natural que expressa os diferentes comportamentos do material decorrentes da sua geometria, tendo a sua forma global sido adaptada às solicitações a que é submetida ao longo da sua utilização.

Este caso ilustra de um modo cabal a importância da geometria na conceção estrutural; esta constitui-se como o conhecimento disciplinar e operativo que permite a geração e manipulação da forma, sendo fator primordial para a conceção do funcionamento

estrutural e secundarizando assim a importância do material que a compõe. Este princípio rompe com a abordagem conceptual da engenharia, que procura no dimensionamento (secção / material), a resposta para a função estrutural da forma arquitectónica; o seu desígnio operativo é deste modo a tensão de rutura do material. No paradigma aqui enunciado a resposta decorre da geometria e do equilíbrio da forma, do desenhar com a direcção das forças, pelo que, através desta lógica é possível alcançar maiores níveis de eficiência estrutural.

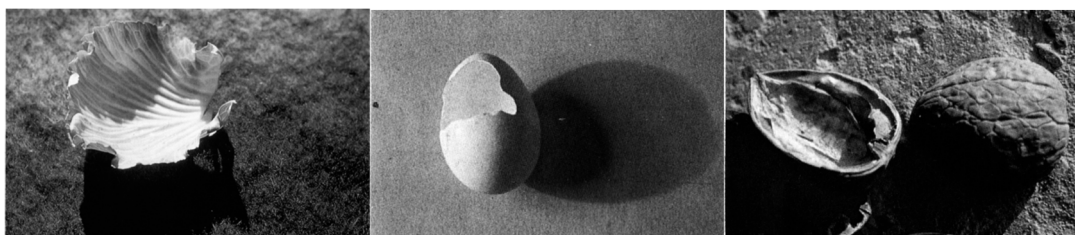


Figura 3. 25 – Eficiência estrutural das formas naturais
(Eficiência estrutural das formas naturais, n.d.)

A geometria constitui-se deste modo como um conhecimento disciplinar que permite operacionalizar a modelação da peça, contudo, é a materialidade e a gravidade que permitem a manifestação da forma, a qual se revela essencial para a condição da arquitetura, enquanto viabilizadora do artefacto arquitectónico. Só a associação da geometria ao conhecimento decorrente da gravítica da forma, isto é, a trilogia geometria-material-gravidade, permitem gerar a forma estrutural.

Esta é a falha da *Morfogénese digital* que tem como paradigma operativo a geometria. A configuração do objeto arquitectónico é feita segundo parâmetros geométricos, manipulados em ambiente digital, no qual não existe nem gravidade nem material, aspetos determinantes para a Arquitetura. Ignorar a ação da gravidade sobre a matéria no momento conceptual é como já vimos anteriormente fragilizar o processo metodológico, com consequências nefastas na arquitetura.

A Morfogénese Digital é gerada em ambiente digital, e não poucas vezes apenas existe neste ambiente e, logo, o choque com a gravidade impede que esta se manifeste enquanto Arquitetura. Esta inconsistência fez com que o ora doutorando encetasse

ainda no âmbito da sua dissertação de mestrado, uma investigação naquilo que então designou como Morfogénese Estrutural, i.e., a geração da forma com base em princípios estruturais; procurava-se com este processo metodológico colmatar as fragilidades reveladas pela Morfogénese Digital, propugnada por Achim Menges.

A consciência da *gravítica da forma* apresenta-se como uma oportunidade conceptual para o exercício da Morfogénese Estrutural, leia-se, o caminhar da força, com profundos impactes na Arquitetura ao nível do espaço, da plasticidade, do desempenho e, até da economia.

A geometria das formas estruturais encarada como disciplina - propriedade do Projeto, apresenta-se como elemento redefinidor dos paradigmas funcionais e espaciais, potenciando e definindo as ordens espaço-formais do conceito de Projecto, em Arquitetura.

A dialética espaço-forma é o objeto disciplinar da arquitetura, através do qual a arquitetura se define e se expressa. A exploração do espaço e da forma, a sua conceção e modelação, bem como a sua caracterização física, solicitam permanentemente a geometria e a *gravítica da forma* como ferramenta de suporte, na conceção de formas estruturais; a geometria apresenta-se como basilar e determinante e este potencial que lhe é intrínseco e que, enquanto catalisador de um processo ideativo, apresenta um forte potencial de desenvolvimento.

3.3. A estrutura na arquitetura

Na sequência das considerações anteriores, vemos assim que o conceito de estrutura embora denso, é igualmente amplo. Contudo, se pretendêssemos realizar uma aproximação intelectual ao conceito, seria possível dizer, com Silva et altri, que é “a maneira como se articulam e estão dispostas as diferentes partes de um corpo.” (Silva and Souto 2015: 21-22)

Esta definição abstrata encerra ainda a noção de hierarquia, que se expressar no pensamento dos autores que abaixo se vão referenciando. Num primeiro momento, em âmbito mais restrito da engenharia, o conceito de estrutura refere-se-lhe enquanto elemento resistente, ou seja, “as partes que suportam e transmitem as cargas de uma construção às fundações.”

Ora, segundo Aurélio Buarque de Holanda (apud Silva and Souto 2015: 17-18), a estrutura em arquitetura é “o conjunto das partes de uma construção que se destina a resistir a cargas; armadura, armação, arcabouço”.

Esta definição apresenta uma visão que não apenas se considera questionável, chegando mesmo a ser redutora, uma vez que não leva em conta os fatores determinantes na relação da arquitetura com a estrutura. É assim importante sublinhar que conceção estrutural é informada por fatores como a organização espacial, a organização funcional, a geometria, a forma gerada pelo espaço, os custos de construção, o tipo de material, a durabilidade, a segurança e a otimização do ciclo construtivo.¹⁰

Já Érico Weidle atribui um carácter mais amplo ao conceito, conferindo-lhe uma dimensão que ultrapassa a função portante (apud Silva and Souto, 2015:17-18). Aí afirma-se que a “estrutura, em arquitetura, é o sistema físico da edificação capaz de transmitir cargas e absorver os esforços de modo a garantir a estabilidade, a segurança e a integridade da construção, sob o compromisso da organização espacial e sua expressão no contexto cultural e social, mediante o adequado emprego dos materiais, as suas técnicas e processos de acordo com os recursos económico-financeiros”.

Este conceito, assim expresso, de forma estrutural parece-nos aportar à abordagem anteriormente enunciada por Weidle o propósito de levar a estrutura um pouco mais além do que é normalmente assumido como referência e que consideramos adequado, pois nesta achamos correto contextualizar, as questões da eficiência estrutural, economia, expressão formal e espacial, em súpula, a síntese que consideramos consubstanciar a forma estrutural.

É possível, pois, concluir que a morfologia das estruturas decorre “do estudo das estruturas resistentes sob o ponto de vista da forma”.¹¹ (Silva and Souto op. cit., loc. cit.). A forma estrutural decorre da aglutinação de um sistema resistente, com a forma arquitetónica entendida como elemento contendor do espaço.

¹⁰ Cf. Silva and Souto 2015: 21-22.

¹¹ Cf. Silva and Souto 2015: 21-22.

3.3.1. Fatores morfogenéticos

A forma estrutural decorre do contributo de um conjunto de fatores que não só a viabilizam como também a determinam. Estes fatores informam em simultâneo o sistema entendido como um todo e as partes que o constituem.¹²

A forma estrutural não decorre de uma abordagem casuística, resulta antes de um processo de síntese entre espaço e que é forma e a estrutura que a viabiliza, visando a estabilidade e desembocando numa expressão formal, capaz de acolher em si, o carácter funcional do espaço, que decorre de uma necessidade organizativa do programa.

Os fatores que cooperam para a geração das formas estruturais designam-se como fatores morfogénicos. Para Daiçom M. Silva¹³ estes fatores podem ser enquadrados em diferentes componentes, que afirmam o seu carácter funcional, técnico e estético da forma estrutural.

¹² Cf. Ibid: loc. cit.

¹³ Cf. Ibid: 23.

Capítulo 4 – Processos de manipulação da forma estrutural

4. Preâmbulo

O conhecimento da fenomenologia estrutural ou, o “caminhar das forças” na aceção já anteriormente explicada, é determinante para a conceção estrutural, pois que, sem o domínio do funcionamento estrutural, a ideação e manipulação da estrutura revelam-se tarefas sem base conceptual e, logo, intencionalidade projetual e, por isso, condenadas ao logro.

A conjugação deste conhecimento com os processos de manipulação da forma, físicos ou digitais, permitem otimizar a forma, bem como exponenciar a criatividade do arquiteto, com o foco de gerar peças inovadoras e com forte expressão plástica, mas também sólidas do ponto de vista conceptual.

O conhecimento dos processos de manipulação da forma torna-se portanto de grande relevância para a densificação intelectual e, inclusive, operativa, do desenvolvimento do processo conceptual da arquitetura, desde logo, no âmbito inicial da manipulação e geração da forma com carácter estrutural, a qual, por essa razão será abordada no próximo subcapítulo.

4.1 Geração da forma estrutural

O material em arquitetura tem sido colocado ao serviço da forma. Este processo iterativo permite a gestão da forma em função do “caminhar das forças dentro da forma construída” (Moraes 1997: 16)

Existe uma relação direta entre a forma e o material, a qual resulta da deformação orientada da forma, condizente com os campos de tensão causados pelo fluxo da força ao longo do objeto arquitetónico.

Nesta metodologia, a forma medeia a deformação do material, que resulta da intensidade e do fluxo de força. A forma é assim expressão direta da direção das forças que nela atuam. A matéria é um palimpsesto que se re-apaga, se re-altera, e se redesenha, em função da direção da força.

Deste modo, saber distribuir a matéria no espaço é uma arte/conhecimento determinante que o arquiteto deve dominar no âmbito da conceção estrutural. A pesquisa formal é suportada por um leque de processos que permitem manipular e aferir do funcionamento estrutural, tanto da matéria como das formas.

O paradigma conceptual atualmente dominante na conceção estrutural, revela-se pouco capaz, do ponto de vista da eficiência estrutural e com elevados impactos, tanto a nível da economia, leia-se o custo por unidade ou conjunto utilizados, como pela eficiência, leia-se a amplitude e concatenação dos recursos consumidos. Já a gestão estrutural, efetuada a partir da geometria e do equilíbrio direto¹⁴ permite a obtenção de formas mais esbeltas, o que implica não só um menor consumo de material, como também possibilita a utilização de materiais menos sofisticados.

A geração da forma estrutural baseada nestes princípios, não se apresenta como uma inovação absoluta, mas antes como o revisitar de um conjunto de saberes e princípios que já informaram anteriormente as práticas de projeto, ao longo das diferentes da História, até ao advento do betão armado, difundido pelo movimento moderno.

Os modelos físicos e digitais constituem-se como processos flexíveis, pois permitem diversos modos de processar o fluxo das forças através do material que formaliza a peça arquitetónica, conseguindo-se deste modo explorar variações de equilíbrio, decorrentes da força e do modo como a matéria é disposta, influenciando assim o funcionamento da forma estrutural.

A expressividade e potencial plástico das formas estruturais despertam atualmente o interesse de inúmeros investigadores, como Toni Kotnik e Michael Weinstock (2012), professores na *Architectural Association*, os quais têm vindo a realizar um conjunto de trabalhos experimentais, desenvolvidos com base na utilização das tecnologias digitais emergentes, cujo tema central é explorar a relação entre o material, a forma e a força.

Filosoficamente, a materialidade é considerada como a consubstanciação de princípios coincidentes, ou seja, da própria matéria constituinte da forma, no espaço, em que o resultado é sempre superior, e mais valioso do que a soma de todas as partes; trata-se da “importação” da Psicologia para a Arquitetura dos trabalhos exploratórios de Wertheim, Koffka e Kohler do conceito da *Gestalts-Theorie* e a importação é

¹⁴ Cf. Morais 1997: 16.

necessariamente aspada, pois que os referidos pensadores tinham já como ponto de partida teórico, precisamente, o design arquitetónico.

Os dois princípios, estão relacionados diretamente com o mundo físico e poético da arquitetura, já que um não ocorre sem o outro e, o mesmo é então dizer que, nenhuma forma, simples ou complexa, existe sem materialização ou sem uma estrutura. No fundo é a recondução à *Firmitas*, na tríade Vitruviana.

Alerta-se para o facto de, a ser assim, a tríade Vitruviana postular consequentemente o existir de uma estética imanente (interior e inseparável do próprio sujeito, a *Venustas*) nas formas estruturais que decorre de uma ética material, onde necessariamente caberá a *Utilitas*. Estes princípios beneficiam a comunidade porque aportam valor plástico e economia, reduzindo os impactos da arquitetura no meio, melhor adequando a Arquitetura ao meio, em função da concordância com o cânone.

4.2 “Form Finding” – pesquisa da forma estrutural

Os processos de *form finding*, segundo Philippe Block, resultam num processo de conceção em que a forma é otimizada do ponto de vista estrutural, o que implica muitas vezes na sua construção a utilização de processos de baixa tecnologia. (Joucka and Francis, 2012:29)

O material é gerido formalmente de modo a que seja capaz de dar resposta às solicitações colocadas pelas direções da força. A pesquisa formal implica a adoção de um conjunto de operações que permitem a manipulação de modelos digitais e físicos, com o intuito de apurar a forma estrutural.

A pesquisa da forma possibilita pois a configuração adequada para o transporte da força, através do conceito do carregamento específico, tornando o seu desempenho mais eficaz, i.e., produtor de resultados, ou do resultado pretendidos. O fluxo de forças e a forma são deste modo interdependentes, em função das opções inseridas no programa. O resultado da forma dependerá consequentemente da força e das direções a que é submetida, bem como da capacidade de o material transportar as forças até um estado de equilíbrio.

O processo de “*form-finding*” recorre muitas vezes a modelos físicos, em que a manipulação da forma é feita com base na gestão da dependência existente entre os pontos suspensos, os pontos fixos e os nós das ligações da malha de cabos. A variação dos valores das tensões existentes em cada cabo, consente infindáveis possibilidades de equilíbrio, o que permite por sua vez gerar outras tantas formas funiculares (que funcionam internamente, do ponto de vista atómico, à tração).

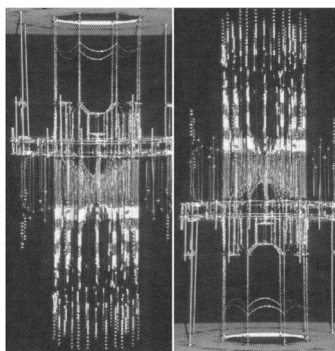


Figura 4.1 – Modelo da cúpula da catedral da cidade de Aachen, Alemanha, desenvolvido por estudantes da Universidade Politécnica de Aachen
 (“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

Esta metodologia permite gerar um vasto leque de soluções de formas antifuniculares (à compressão) de grande eficiência estrutural. Este universo formal remete-nos para a utilização de geometrias baseadas na curva ou derivadas dos seus respetivos segmentos.

A construção destas formas durante um longo período da Humanidade foi feita de modo empírico. Este universo formal (formas curvas e de dupla curvatura) funda-se no funcionamento estrutural das catenárias. No séc. XVII toma-se consciência da relação entre a catenária e a linha de pressão, i.e., a linha de impulso da força, aumentando-se assim a capacidade de conceber e gerir a curvatura dos arcos, abóbadas e cascas (Otto and Rasch, 1995: 136). É exemplo espetacular, embora capcioso, da catenária invertida, a cúpula da Catedral de São Paulo, de Wren. As “cascas” em betão armado ou em alvenaria armada resultam deste modo da cristalização da curvatura definida por uma catenária manipulada fisicamente.

Os métodos que recorrem a forças verticais para um cálculo rigoroso de arcos e cúpulas, resultam numa abordagem baseada no funcionamento estrutural, mais do que numa

abordagem espacial, privilegiando o elemento estrutural em detrimento do espaço e da sua configuração formal.

Percebe-se assim este fenómeno, acompanhando o périplo intelectual de Joucka and alt, quando é afirmado:

(...) existe a necessidade de métodos interativos de equilíbrio tridimensional que ofereçam o controlo e flexibilidade ao projetista e que permitam ao utilizador entender as interdependências das rígidas restrições impostas pela gravidade. (Joucka and Francis, 2012:40)

Por sua vez, Philippe Block recorre a meios digitais para a gestão e conceção de polígonos funiculares, nos quais as forças se encontram organizadas em torno de malhas geridas através de processos TNA.

Os processos de “*mesh relaxation*” são capazes de produzir resultados mais interativos, em que este processo responde de modo mais eficiente à gestão dos fluxos das cargas e em simultâneo à configuração formal e espacial da forma. Deste modo a abordagem foca-se no carácter espacial e formal relegando para um plano subsequente a dimensão estrutural intrínseca à gestão da forma estrutural. (Joucka and Francis, 2012:31)

O trabalho desenvolvido por Chander e Pedresschi, no seu livro “*Fabric Formwork*” permite a estes autores apresentar um processo de trabalho que recorre a métodos físicos funiculares e digitais, que procuram inspirar-se nas formas de Gaudi, como modo de criar um vínculo com o processo de fabricação, invertendo-os depois e criando formas anti funiculares.

Também os trabalhos desenvolvidos por Isler, através das suas membranas, e Gaudi, valendo-se das catenárias, revelam um modo expedito para a gestão formal da dupla curvatura, Chander aponta mesmo estes métodos como processos de otimização estrutural.

Já Mark West considera que estes trabalhos podem ser potencializados através da utilização de ferramentas digitais (2008:25) pois ao contrário destes, os modelos físicos normalmente acarretam, não só, maior tempo de construção, maior desconforto e

dificuldade em medir com precisão os modelos físicos como também, para além disso, maior dificuldade em quantificar a tensão existente nos cabos do modelo, pelo que se pode concluir pela maior desvantagem na sua utilização.

A medição da tensão e das deformações destes sistemas requer a instalação de medidores de tensão, o que se afigura demorado e interfere potencialmente na configuração do modelo. O projeto é assim “congelado” para permitir a iteração, e para que sejam quantificadas as tensões no modelo num determinado estado de carregamento. A quantificação das tensões é, neste método, um processo estranho ao ato de conceção, o qual é precisamente o que fundamentou inicialmente o recurso ao modelo.

Percebe-se assim que, Chandler e Pedreschi (2007:2) ao reavaliarem os modelos e os processos, propõem na realidade a conjugação de ferramentas digitais (TNA) e processos analógicas (modelos físicos-catenárias) bem como os materiais adequados.

4.3 Estática Gráfica

Os métodos de cálculo gráfico foram os primeiros processos de aferição que permitiram inferir e manipular a forma de modo a obter o melhor funcionamento estrutural das peças arquitetónicas a construir. O conhecimento teórico desenvolvido no campo da física permitiu no séc. XIX a respetiva aplicação prática no âmbito do exercício profissional na Arquitetura.

A estática gráfica tem como objetivo encontrar o equilíbrio do objeto arquitetónico recorrendo à utilização de processos gráficos, sendo a sua equidade decorrente da exatidão e do rigor colocado no processo.

Estes processos gráficos têm origem na Renascença e fundam-se conceptualmente no axioma do paralelograma de forças já utilizado por Leonardo Da Vinci (1452-1519).

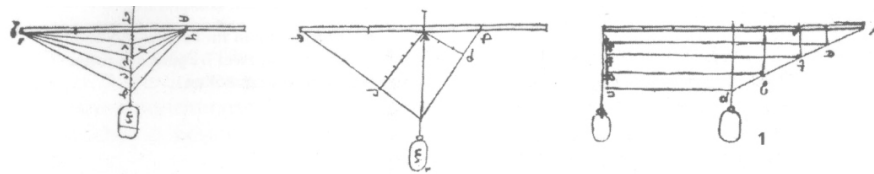


Figura 4.2 – Decomposição forças descritas por Leonardo Da Vinci

(“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

A estática gráfica que utilizamos funda-se no trabalho produzido por Karl Culmann (1821-1881), professor de estática da Escola Politécnica de Zurique (ETH). A sua monografia publicada entre os anos 64 e 66 do séc. XIX, define a estática gráfica como uma aplicação da nova geometria ao estudo da estrutura, com o objetivo de obter o equilíbrio dos objetos arquitetónicos.

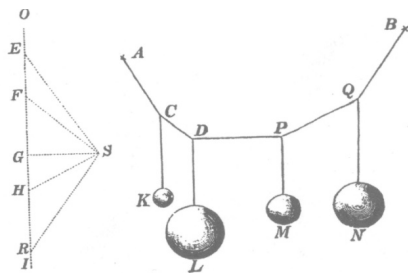


Figura 4.3 – Composição e decomposição de forças segundo Pierre Varignon

(“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

Culmann suporta o seu método na relação introduzida por Pierre Varignon entre a composição e a descrição das forças, tendo estabelecido uma relação direta entre o polígono de forças e o funicular de um sistema de forças.

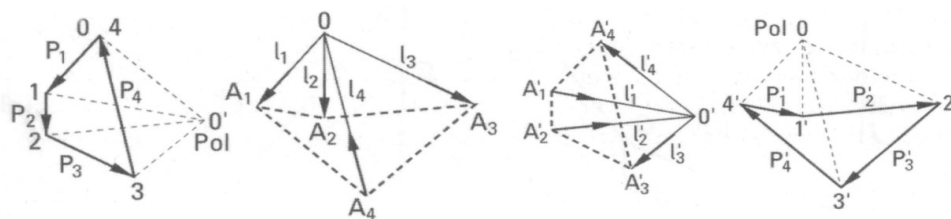


Figura 4.4 – Relação estabelecida entre o polígono de forças e os funiculares

(“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

Este processo gráfico permite com grande eficiência a visualização e gestão do equilíbrio dos elementos estruturais, tendo por isso tido uma grande divulgação e utilização durante o séc. XIX. A sua metodologia revela-se eficaz não só no desenho estrutural das peças arquitetónicas, como também evidencia o carácter visual do processo que apresenta uma enorme potencialidade didática, para o ensino e compreensão do funcionamento mecânico das formas estruturais. (Jacobe, 2004:1)

As técnicas gráficas, conhecidas nos nossos dias, foram desenvolvidas no último quartel do séc. XIX, pelo Professor Dr. Wilhelm Ritter (1847 - 1906), que foi o mais notável dos alunos de Cullman. O método de Ritter determina os esforços internos em treliças, sendo este processo de cálculo ainda hoje utilizado.

Ritter escreveu, entre 1888 e 1906, um tratado de estática gráfica, em quatro volumes, designado *Anwendungen der graphischen Statik*.¹⁵ Esta publicação foi a primeira de carácter científico a abordar casos práticos, estabelecendo uma relação direta entre o âmbito teórico e o exercício profissional, tornando-se por este facto o manual de formação de muitas gerações de calculistas estruturais.

Este método possibilitou, não só o cálculo estrutural, como também dotou os projetistas de uma ferramenta de conceção, permitindo o desenho de formas estruturais otimizadas, a par do desenho, bem como a exploração das potencialidades expressivas da estrutura. O método revelou-se ainda capaz de responder aos desígnios plásticos em diferentes épocas.

A operatividade do método é amplamente demonstrada no desenho de uma grua metálica, no qual Ritter otimiza a dimensão das secções em função da sua altura, sendo que, como bem se perceberá, esta peça demonstra bem o espírito do seu tempo.

¹⁵ CF. Ritter W., K. Culmann and H. Ritter (1900) *Anwendungen der graphischen Statik*. Meyer & Zeller.

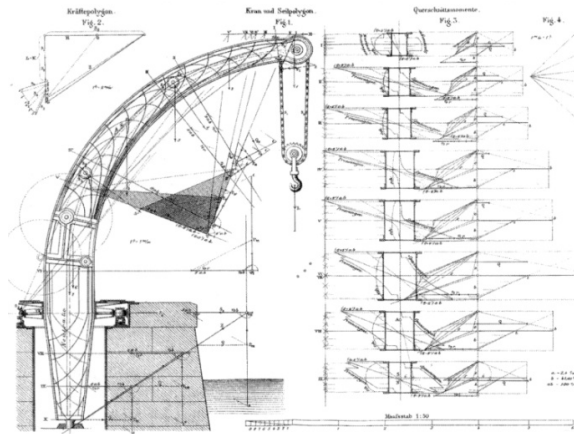


Figura 4.5 – Grua metálica, segundo o desenho estrutural otimizado de Ritter
 (“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

A partir de 1900 a estática gráfica perde importância devido aos avanços na teoria de cálculo, tendo-se verificado uma rutura entre o desenho, o cálculo e a construção. Neste contexto, a conceção estrutural separa-se do cálculo que se torna um processo analítico, menos empírico e menos intuitivo.

A estática gráfica, apesar de diminuir a sua utilização no âmbito profissional, manteve a sua utilização no âmbito académico, sendo uma ferramenta de ensino muito utilizada devido às possibilidades que oferece, para visualizar e compreender o comportamento estrutural da peça projetada, sem recorrer a cálculos complexos e morosos.

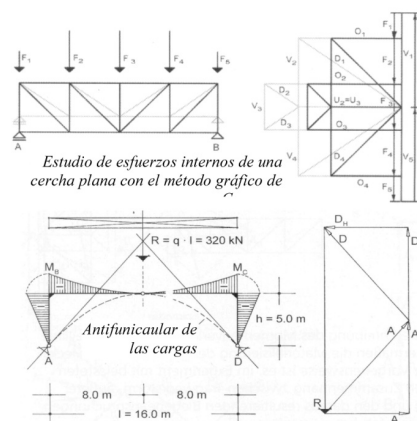


Figura 4.6 – Estudo de esforços internos de uma treliça com o método gráfico de antifunicular das cargas
 (“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

A interação entre o desenho, o cálculo e a construção que este processo permite, possibilita manipular a forma estrutural, de modo a otimizar a conceção e a implementação das peças, recorrendo a uma base teórica e operativa simples e de fácil aprendizagem.

O exemplo da simplicidade e eficiência do processo é demonstrado no esquema de cálculo realizado para um pórtico triarticulado. Este método baseia-se na geração de uma forma antifuncular a partir de um polígono funicular de forças, tornando assim possível determinar as reações dos apoios e as tensões máximas de flexão. (Jacobo, 2004)

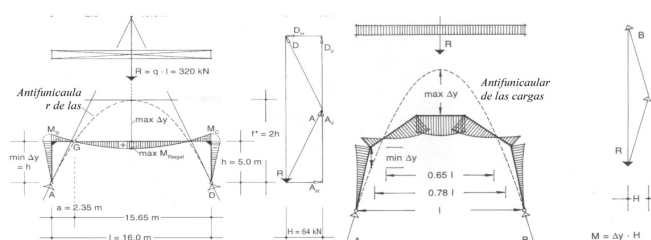


Figura 4.7 – Antifuncular das Cargas
(“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2014)

A estática gráfica permite também a análise de peças arquitetónicas já existentes, o que a torna especialmente adequada, para a avaliação de edifícios com alto valor histórico. O método permite em contexto académico a compreensão e avaliação do comportamento estrutural destes edifícios.

Esta ferramenta de alto valor didático permite a reconstituição do funcionamento estrutural das tipologias estruturais empregues, de um modo intuitivo e sem recorrer a cálculos complexos e abstratos, usando para tal, modelos funiculares.

Uma limitação séria deste método decorre de os valores apurados dependerem do rigor gráfico do utilizador, o que condenou o método, face ao aparecimento dos modelos analíticos de rigor, menos questionáveis e mais taxativos. Este afiguraram-se bastante mais credíveis aos olhos dos utilizadores e dos consumidores finais da peça arquitetónica.

O declínio da estática gráfica afastou o arquiteto do cálculo da estrutura, a qual fazia então parte da sua formação base e era uma ferramenta de conceção do artefacto arquitetónico. Como se pode constatar pelos desenhos da Fig. 4.8 infra, o traçado funicular determinava a secção sendo a peça desenhada por cima do polígono funicular.

O rigor de desenho aportado pelas ferramentas digitais de grande precisão, permite-nos agora revisitar estes métodos com uma fiabilidade de cálculo diferente, podendo tornar-se uma ferramenta fácil de utilizar e profundamente validante no processo de conceção e cálculo, de então.

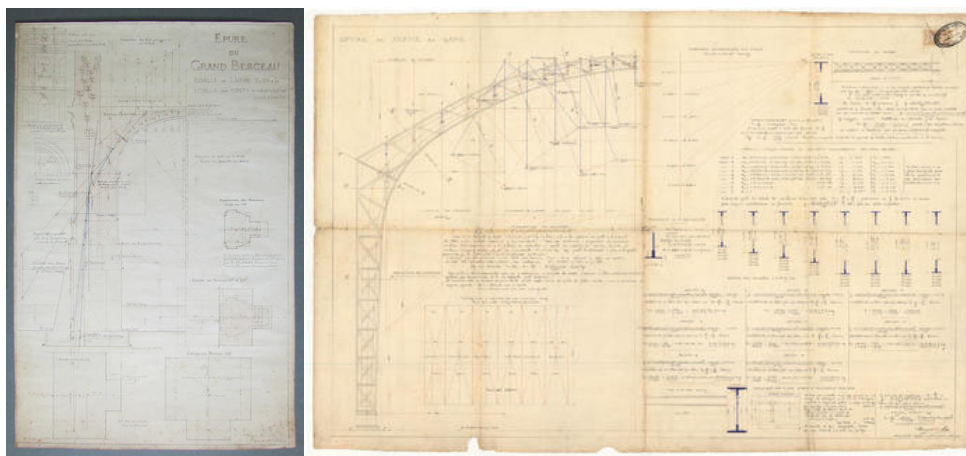


Figura 4.8 – Desenhos Marques da Silva, Atelier Laloux, Paris, 1890-1896
(Acervo pessoal do arquiteto – Fundação Marques da Silva, n.d.)

4.4 Modelos Físicos

Os modelos físicos construídos à escala revelam um elevado potencial didático, sendo possível não só inferir o comportamento dos materiais e do seu funcionamento estrutural sob a influência da ação da gravidade, como também auxiliar a compreensão dos conceitos teóricos, cuja explicação analítica, com um elevado nível de abstração, dificulta o seu entendimento.

Os modelos produzidos simulavam de forma verosímil a ação da gravidade sobre a matéria, sendo possível apurar a forma estrutural através da utilização destes modelos.

Os modelos físicos permitiram por isso uma compreensão da fenomenologia do fluxo de forças, em superfícies funiculares, como arcos, abóbadas, cascas e membranas.

A solução final decorre de um compromisso entre a função e a plástica da forma, assim a distribuição uniforme da força resulta do peso próprio do material, que é responsável pelas deformações decorrentes das cargas a que se submetem as tipologias estruturais, concretamente a catenário e o arco parabólico.



Figura 4.9 – Geração das “formas naturais”, catenária e arco parabólico equivalente
(“The new Structuralism Design”, 2008: 12)

Nas catenárias, a força gravítica atua enquanto peso próprio dos cabos, os quais pela sua natureza dinâmica geram uma geometria curva, decorrente do posicionamento dos pontos fixos. A ação da gravidade sobre o material faz com que este se comporte, de modo a produzir uma forma estruturalmente otimizada, isto é, uma catenária que, quando invertida, dá lugar a um arco parabólico.

A repetição de uma tipologia estrutural como a dos arcos permite a geração de uma superfície curva a que chamamos abóbada, que apresenta não só um maior potencial estrutural, mas também formal.

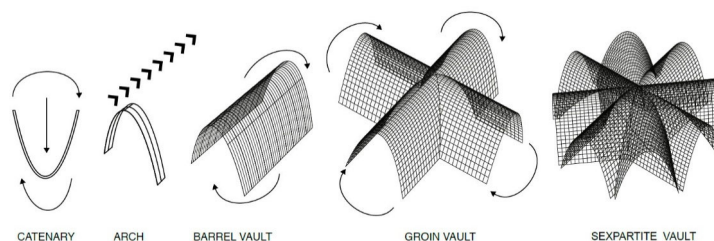


Figura 4.10 – Transformação de uma catenária simples em abóbadas estruturais mais complexas e eficientes
(Joucka and Francis, 2012:10)

A forma produzida revela-se de grande eficiência estrutural sendo a resposta formal mais eficaz para os pontos de apoio definidos e para a quantidade de matéria disponibilizada. A geometria obtida condiciona o trabalho interno do material, sendo neste caso produzidos esforços de tração. A inversão desta geometria configura um arco parabólico e esta alteração geométrica produz uma alteração no trabalho interno, que neste caso solicita ao material a produção de esforços de compressão. (Salmon, 1879:287-289)

Este modelo de gestão formal despertou o interesse de um conjunto de projetistas como Gaudi, Isler e Otto que recorreram a este processo com o intuito de gerar formas funiculares.

Este sistema apresenta uma enorme versatilidade formal e tectónica, podendo ser materializado através de diversos materiais e sistemas construtivos, sendo no entanto a sua principal característica a capacidade de cobrir grandes vãos com secções mínimas, razão porque estes princípios estão na base conceptual de pontes, coberturas suspensas e tendas pesadas. O cálculo destas formas estruturais sofre uma simplificação, mesmo tendo em conta que à posteriori se devam submeter a testes e a análises no âmbito da engenharia estrutural.

Os modelos físicos dos funiculares permitem de um modo fácil, sem o recurso a cálculos complexos, determinar os pontos críticos e a deformação da peça, possibilitando ainda uma abordagem qualitativa da conceção estrutural. A gestão da forma, em função dos trabalhos internos, permite a sua manipulação plástica, exponenciando a expressividade da estrutura, sem perder o foco na sua otimização estrutural.

4.4.1 Princípios da Inversão e de Construções Suspensas

O princípio da inversão resulta do processo evolutivo do conhecimento humano que culmina com a formulação feita em 1676, por Robert Hook (1635-1703).

Pela primeira vez se sintetiza num modelo o comportamento atômico da matéria; mais tarde, em 1748, esta teoria foi abordada de um modo gráfico pelo matemático Giovanni Poleni (1683-1737).

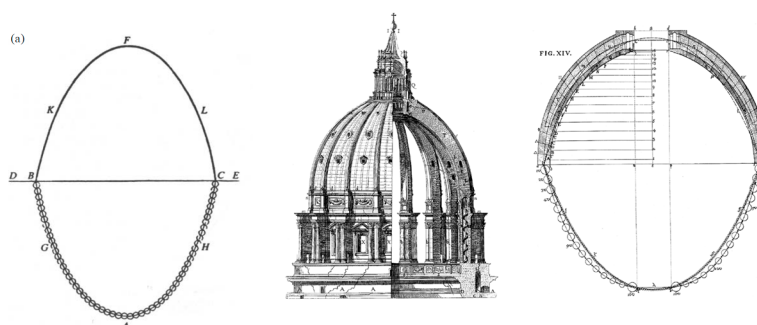


Figura 4.11 – Modelos gráficos produzidos Giovanni Poleni, (a) analogia arco parabólico e catenária, (b) Análise gráfica realizada em 1748 à cúpula da Catedral de São Pedro

(Block, P., M. Dejong, and J. Ochsendorf, 2006)

O processo gráfico de Poleni foi passado para a arquitetura pelo processo de pesquisa formal utilizada pelo arquiteto Heinrich Hubsh (1795-1863) e pelo trabalho de Gaudí (1852-1926). (Otto and Rasch, 1996: 134)

A inversão de uma forma suspensa consiste em tomar como base todas as coordenadas de sua superfície, e mantê-las em todos os pontos que as definem, nas mesmas coordenadas x e y e alterar o z para o seu valor simétrico.

A ideia por detrás desse procedimento é a de que a forma suspensa se encontra inteiramente tracionada, pelo que a estrutura definitiva resulta uma forma antifuncular.

Podemos dar como exemplo, a geração de um arco parabólico ou uma superfície parabólica, obtidas por um processo de inversão, na qual a superfície ficará a funcionar inteiramente à compressão, uma vez mantida a natureza do carregamento aplicado.

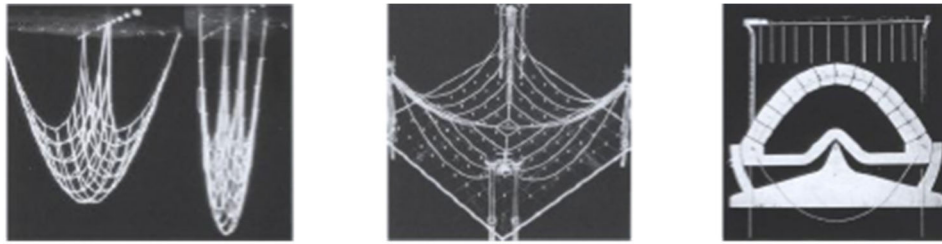


Figura 4.12 – Modelo de suspenso feito com correntes; Modelo invertido de correntes para projetar abóbada; Demonstração da inversão de uma catenária para calcular a linha de pressão de um arco
(Nerdinger, 2005:70;78)

4.4.1.1 Antoni Gaudí

Antoni Gaudí foi o mais brilhante utilizador de modelos funiculares, servindo-se deste processo para gerar as formas dos seus projetos. A sua obra ilustra de modo cabal, o potencial formal e estrutural desta metodologia.



Figura 4.13 – Parque Güell, Análise do comportamento estrutural do muro de contenção
("Park Güell – Gaudí House Museum", 2016)

Antoni Gaudí recorre à construção de funiculares físicos, para conceber a maioria dos seus projetos, sendo a Igreja da Sagrada Família o mais eloquente dos exemplos. A partir de uma base à escala (1:10) manipula as catenárias geradas pela suspensão de cordas através da fixação de sacos cheios de areia. Utiliza perfis de madeira que fixa à base, a partir dos quais suspende cordas, simulando pilares e arcos e, para simular paredes e abóbadas suspende têxteis.



Figura 4.14 – Modelos funiculares realizados para a Sagrada Família , Barcelona, 1898-1908, Antoni Gaudí

(“Funicular Structures: Antoni Gaudí and the Cripta de la Colònia Güell”, 2011)

Gaudí realizava fotos dos funiculares em ângulos diferentes, sobre as quais pinta. Este processo permite-lhe ir obtendo as seções da igreja. (Jacobo, 2004)

Gaudí tinha um caráter prático por excelência, pelo que o desenvolvimento dos seus projetos não resulta do desenho, mas de um processo de construção e manipulação física de modelos funiculares. Através de um processo decorrente de tentativa e erro, experimentava e otimizava as formas estruturais até alcançar o espaço arquitetónico pretendido.

4.4.1.2 Heniz Isler

Após ter observado um tecido molhado em suspensão que gerava uma concavidade, Heniz Isler compreendeu que esta superfície se criava por tração pura, tendo a partir daí encetado a investigação de um novo processo metodológico, usando as referidas membranas, o que lhe permitiu gerir tridimensionalmente superfícies curvas, tal como a suspensão de um cabo permite a gestão bidimensional das catenárias.

Facilmente se consegue depreender que o processo com que Isler se confronta configura uma deformação do material que gera o equilíbrio da forma gravítica.

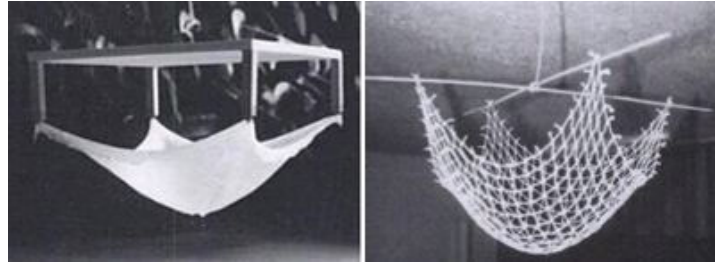


Figura 4.15 – Geração da forma através da utilização de uma membrana invertida
 (“heinz isler fabric model study chiltern – Exemplary Projects [Cold Harbour] by Charlotte Cooper”, 2014)

O universo formal de Isler, pela sua complexidade, não se podia definir a partir de equações matemáticas ou de fórmulas, fruto das variações constantes ao longo da forma, as quais decorrem da manipulação dos diversos pontos que a suspendem.

A sua investigação e pesquisa formal pautam-se pela originalidade, constituindo-se o modelo referido como a sua grande inovação a nível da abordagem conceptual. Isler pensou a forma estrutural em três dimensões e, por isso, a sua pesquisa formal não é feita nem parte de uma só dimensão, ela resulta multidimensional e decorre da compreensão tridimensional das formas de dupla curvatura.

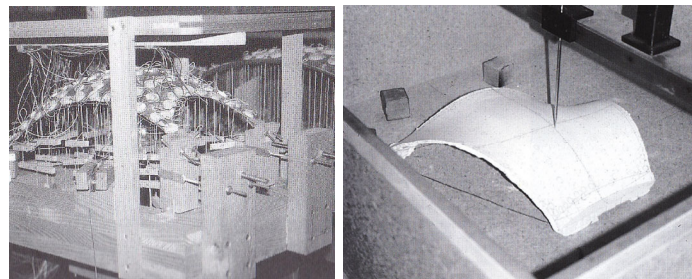


Figura 4.16 – Métodos utilizados por Isler na conceção de cascas, avaliação e medição da casca
 (“Chilton, The Engineer’s Contribution to Contemporary Architecture” 2000:45)

Não obstante o domínio analítico, a metodologia de Isler passa sempre pelo recurso a um modelo tridimensional que é medido exaustivamente e meticulosamente. Só então e após um conhecimento profundo da forma, o processo evoluía para outros estágios de desenvolvimento.

As maquetas revelam-se ainda como uma ferramenta de trabalho de grande utilidade, uma vez que a expressão da forma é muito credível e aproximada à imagem final do projeto, permitindo trabalhar sobre elas no sentido de alcançar os objetivos pretendidos a nível formal, estrutural e plástico.

Num documento seminal para a geração das formas de dupla curvatura, Isler plasma 39 “cascas” retiradas de um vasto lote que resulta das suas investigações. Se alguma crítica se poderá fazer é a de que este universo formal é contudo, desprovido de referências culturais e arquitetónicas, contudo, o contrário pode igualmente ser afirmado de duas maneiras, primeiro, de que as formas preconizadas podem re-visitar anteriores referências culturais e arquitetónicas e, segundo, que permitem perspetivar novos rumos, que rompam ou prossigam, com ou sem divergência, relativamente a contextos anteriores.

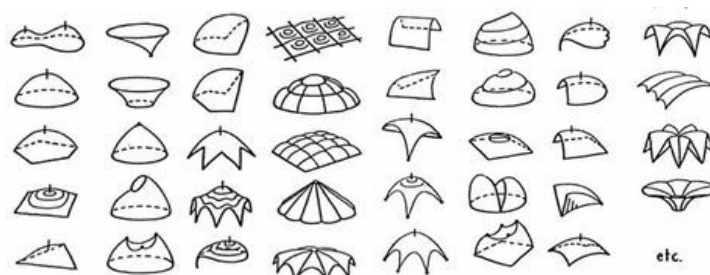


Figura 4.17 – Conjunto de cascas concebidas por Isler, retiradas de um vasto lote de soluções que conceptualizou, 1961
 (“Chilton, The Engineer’s Contribution to Contemporary Architecture” 2000:45)

4.4.1.3 Frei Otto

Por sua vez, Frei Otto usa um conjunto de métodos para otimizar e gerir as formas estruturais, que vai concebendo ao longo da sua carreira. O recurso a formas de “autoformação” (self formation) através da interação dos materiais com a gravidade, também chamadas formas ou construções naturais, permitiu-lhe a procura de soluções com menos recursos, com um melhor desempenho estrutural e uma forte expressão plástica.

Esta abordagem metodológica permite não só romper com a uniformidade espacial, mas também com os excessos construtivos. Frei Otto desenvolve um conjunto vasto de

técnicas e processos com vista à manipulação da forma partindo de critérios pautados pela eficiência.

4.4.1.3.1 Modelo em rede

Otto aplica em 1950 os conceitos de Gaudí de um modo científico, o seu método baseava-se na construção de modelos à escala, analisando de seguida o seu comportamento estrutural, através de modelos matemáticos.

Os modelos físicos fascinam os projetistas como Otto, o qual chega mesmo a referir que: desde o momento em que tentou “(...) *pela primeira vez construir estas formas invertidas*” não mais deixou de brincar com o que então chamou de “... um brinquedo maravilhoso”. (Salmon, 2008:31)

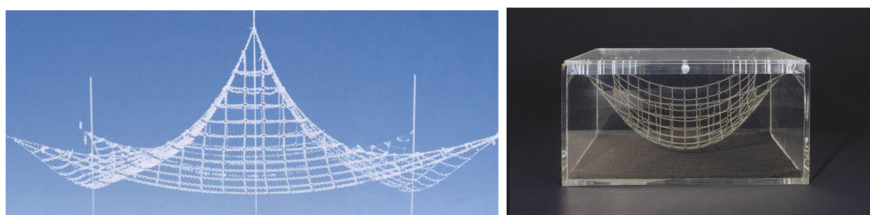


Figura 4.18 – Modelo de construção de cobertura suspensa feito com correntes, Cúpula invertida de correntes suspensa por quatro pontos
(Nerdinger, 2005:24;68)

A conceção destes elementos estruturais baseia-se nos processos de inversão da catenária ou da membrana, tornando-se deste modo possível o cálculo da curvatura capaz de dar a necessária resposta estrutural.

Otto compreende as potencialidades intrínsecas deste método pelo qual é possível converter o processo autónomo de formação presente nas estruturas em tração para estruturas em compressão. (Nerdinger, 2005: 24)

“Em Chartres, comecei a experimentar o princípio de inversão – por outras palavras, a desenvolver arcos em estados suspensos e continuei o trabalho

em casa. É o simples caso do molhar um lençol em gesso, pendurá-lo e invertê-lo quanto estiver enrijecido. Foi o meu pai que me deu esta ideia. Nessa altura ainda não tinha conhecimento de Gaudí (..).”(Otto and Rasch, 1996:134)

Entre 1962 e 1972, Frei Otto participa no desenvolvimento do estádio Olímpico de Munique. O processo de conceção desta peça arquitetónica baseou-se na manipulação de correntes suspensas pelos extremos, que geravam uma superfície de dupla curvatura, apurando assim uma forma antifunicular.

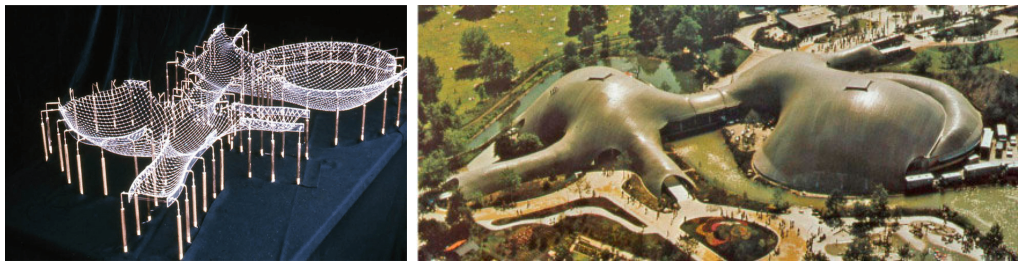


Figura 4.19 – Modelo funicular desenvolvido para o pavilhão, Mannheim, Alemanha, 1975, Otto.
(Nerdinger, 2005:24;78)

A minúcia com que foram construídos os modelos permitiu a sua medição, através do uso de várias técnicas de grande precisão, como é o caso da fotografia pelo qual

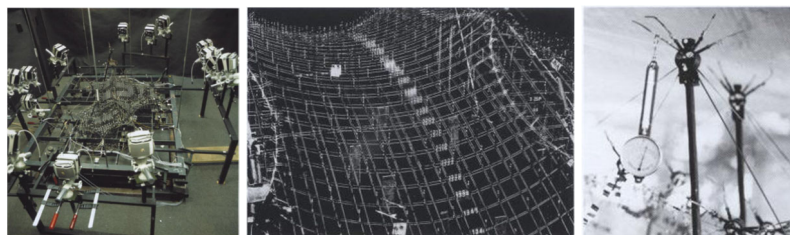


Figura 4.20 – Modelo de medição fotográfica através da câmara fotográfica Linhof, processo de dupla exposição fotográfica utilizado para medição da deformação, medição das forças nas extremidades da cobertura
(Nerdinger, 2005:264,265)

sustentou a planificação das formas orgânicas utilizadas na construção do estádio olímpico. Os valores das tensões obtidas através destes métodos foram extrapolados e convertidos de maneira a permitir-lhe obter valores reais. (Nerdinger, 2005: 269)

O uso das catenárias permitiu também a gestão formal, de abóbadas e conchas morfo-resistentes e estas tipologias estruturais constituíram-se como um léxico que serviu para um conjunto de estudos realizados por Otto e pelo IL (Instituto de Estruturas Ligeiras de Estugarda). (Otto and Rasch, 1996: 138)



Figura 4.21 – Abóbada criada a partir de tiras de tecido endurecidas com gesso
Figura 76 - Modelo suspenso para o estudo morfológico e estrutural
do projeto de Mannheim
 (Nerdinger, 2005:223,256)

No projeto de 1971 da Exposição Federal de Jardins, em Mannheim desenhado pelos arquitetos Mutschler, Langer und Partner, em colaboração com Otto e o seu instituto, as malhas metálicas e rede de correntes permitiram controlar e conceber as formas com curvaturas, apurando a relação destes modelos com as reais necessidades estruturais do edifício.

Sobre este assunto, expende Otto:

“Os modelos de form-finding e o seu desenvolvimento’ ... permitiram “chegar a uma forma” ... de “abóbada que” consistiu “numa malha de força igual e continua feita de ripas de madeira. Não foi só o desenho da estrutura que foi determinante pelo processo de formação própria na tradução da forma para a arquitetura; a montagem desta rede seguiu este princípio também (...).(Otto and Rasch, 1996: 138)



Figura 4.22 – interior Multihalle de Mannheim, 1971, Mutscher, Langer e Frei Otto
(Nerdinger, 2005:287)

4.4.1.3.2 Modelos de películas de sabão

A designação adotada por Frei Otto, “*minimal path*” foi um tema abordado nos seus exercícios minimalistas de 1958 e aprofundados em 1960 na Universidade de Yale. (Otto and Rasch, 1996: 68)

A pertinência deste estudo decorre da possibilidade de determinar um conjunto de pontos que unidos entre si formalizam um percurso mínimo. Por este motivo, a superfície obtida é altamente vantajosa para as diferentes finalidades construtivas e preservação da estrutura. O domínio destes parâmetros produz um uso mais eficiente dos materiais, reduzindo a respetiva quantidade utilizada na formalização do projeto.

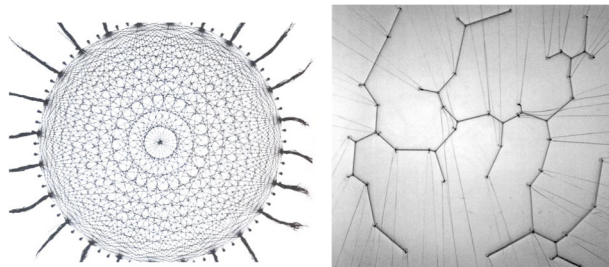


Figura 4.23 – Exemplo do exercício de caminhos mínimos. Cada ponto é ligado de forma a criar uma malha radiocêntrica, Lamelas de sabão desenham a ligação redutora entre os diversos pontos
(Nerdinger, 2005:45)

A redução destes elementos à sua expressão mínima traduz-se numa eficiência energética construtiva, tendo igual expressão na manutenção e na melhoria do fluxo das forças uma vez analisadas as “redes de tráfego”.

Estes caminhos mínimos foram estudados recorrendo entre outros métodos ao uso de películas de sabão, cuja formalização definia uma superfície mínima.



Figura 4.24 – Modelo de película de sabão em forma de onda estrelar (esquerda) aplicação em da forma gerada, Bundesgartenschau Köln, 1957 (direita)

(Nerdinger, 2005:45)

Estes processos de formação da forma revelavam com eloquência a possibilidade de reduzir uma estrutura ao seu essencial, tendo por isso merecido a atenção de Otto. O seu trabalho e os princípios por ele veiculados revelam-nos procedimentos de gestão com maior eficiência, tanto das estruturas como dos seus materiais, tendo conduzido a uma nova visão em que a “*redução formal, material e eficiência energética podem ser apurados positivamente*”. (Otto and Rasch, 1996: 74)

A simulação dos processos de autoformação acarreta, contudo alguns cuidados, desde logo com a escala das forças atuantes sobre o material. A aferição dos resultados obtidos, resulta do modo apropriado como são escalados os materiais e as forças atuantes. É neste sentido que Cervera Sarda escreve:

A Natureza, tal como o Homem, realiza um processo eficaz, económico, funcional e de validade universal. No Universo não há nada que não seja “coerente” e “consequente”, tal como não há nada que não seja apropriado para cumprir a sua finalidade da melhor forma possível e para contribuir à ordem e equilíbrio do “todo”. (...) tudo tem um porquê e para quê e tudo está gerado sob um critério de eficiência. (Cervera Sarda, 2011: 14-15)

As construções biológicas revelam-nos uma inter-relação constante entre a forma, massa e energia, constituindo-se como uma lição no campo das formas estruturais. Esta trilogia é o elemento chave de qualquer construção, independentemente da sua origem. Assim, podemos concluir, acompanhando Songel que:

“Do ponto de vista físico, a melhor construção é aquela que utiliza o mínimo de energia e material; uma construção assim é em certas ocasiões, especialmente bela”. (Songel, 2008:11)

Esta citação permite definir com exatidão os princípios da construção ligeira. As formas de construção ligeira resultam do desenvolvimento e otimização de processos, baseando-se na redução de massa. Este processo é visível em várias formações naturais.

O estudo da relação entre a forma e a estrutura teve como um dos seus precursores Galileu Galilei (1564-1642). Este concluiu das suas análises mecânicas, que o crescimento da forma é proporcional às suas necessidades estruturais, sendo a proporção um elemento determinante na sua eficácia.

Nas suas investigações D’Arcy Thompson (1860-1948) conclui que o aumento da forma induz uma perda de eficiência estrutural e mobilidade locomotora. Não sendo, um princípio universal, é recorrente que o aumento da forma e do volume, induz um aumento proporcional da estabilidade.

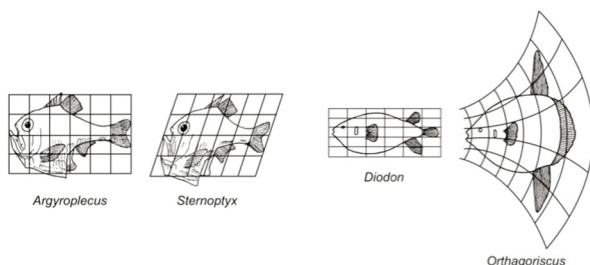


Figura 4.25 – Exemplos de deformação paramétrica por ação do meio, realizados por D’Arcy Thompson
 (“On Growth and form”, n.d.)

Otto estava ciente desta realidade e ao longo das suas investigações desenvolve vários mecanismos de medição capazes de avaliar a relação entre a resistência e a massa. Estes instrumentos permitem a comparação de diferentes tipologias construtivas realizadas com diferentes matérias, viabilizando a transposição destas relações para o universo da arquitetura e da engenharia.

Os diagramas Bic/ λ resultam das técnicas de medição para o cálculo material do comprimento final dos elementos estruturais criadas por Otto.

Podemos esquematizar o caminho matemático subjacente ao percurso intelectual do referido Autor, mediante a recordação da fórmula por ele proposta: $Bic = m/F \cdot s$; $\lambda = s/\sqrt{F}$

O valor Bic representa a relação entre a massa (m) de uma construção para a sua capacidade de transferir a força (F) sobre a distância (s). Quanto menor for o valor, maior será a sua eficiência estrutural indiciando uma otimização estrutural e formal.

A esbelteza relativa (λ) de um corpo estabelece uma relação entre a distância e a carga transferida (s) para a força (F) transferida. (Nerdinger, 2005:50)

Frei Otto acreditava que este princípio de gestão dos recursos e eficiência, presente na natureza, deverá informar as estruturas técnicas da arquitetura, incrementando a sua qualidade. Salaria de resto as condições específicas da arquitetura, as quais influenciam e determinam a forma e a sua relação com a massa, como resposta ao meio.

A relação entre Forma, Energia e Massa constitui-se como uma trilogia essencial para a otimização das estruturas. Quanto maior for o equilíbrio e articulação entre estes fatores maior será a sua eficiência construtiva e estrutural.

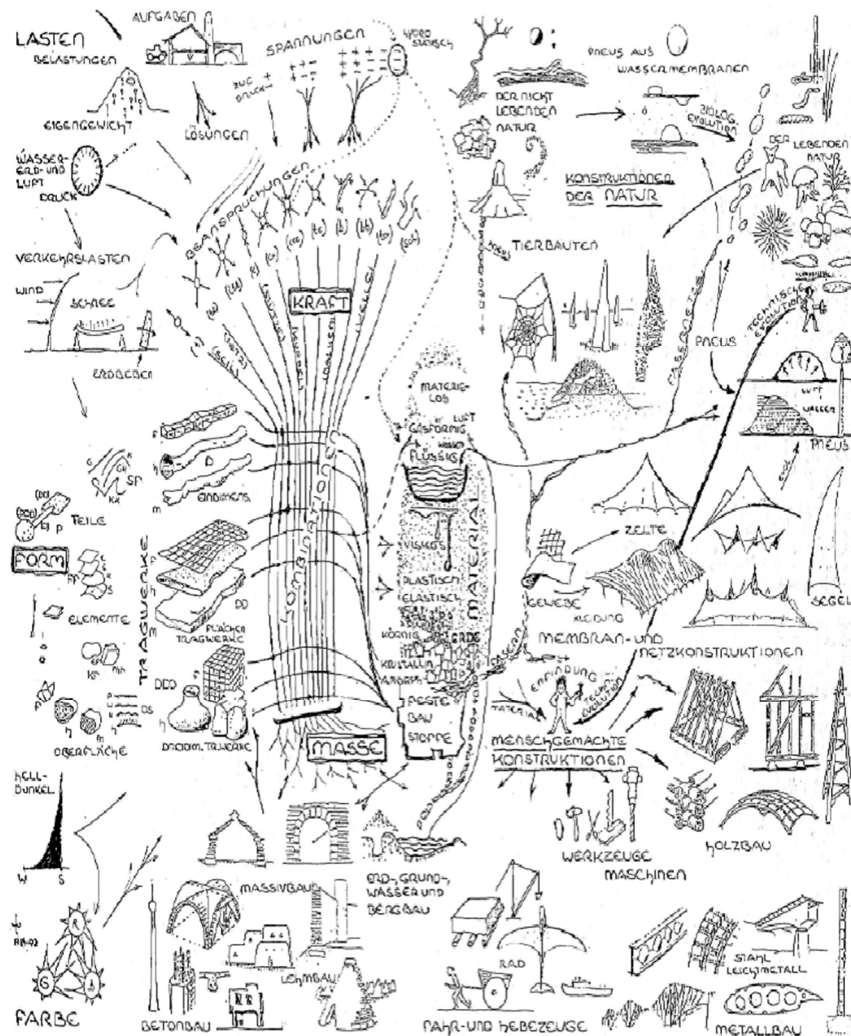


Figura 4.26 – Sinopse gráfica de relação entre forma, força, massa, material em diferentes sistemas estruturais da Natureza. Frei Otto, IL 23 (Nerding, 2005:224)

4.5 Processos digitais de estática gráfica

Os métodos de estática gráfica beneficiam com o desenvolvimento dos processos de desenho assistido por computador (CAD). A estática gráfica adquire, com as ferramentas digitais, uma precisão nunca antes alcançada com outros processos de desenho e a exatidão de cálculo alcançada, possibilitando o cálculo e a análise de estruturas complexas, bem como, a visualização do comportamento estrutural das obras concebidas.

Neste capítulo é possível dar como exemplo a cúpula que cobre a escada principal do Palácio Municipal da cidade de Berlim, o Roten Rathauses. (Jacobo, 2004)

Esta cúpula está recoberta por ladrilhos, não sendo possível verificar de imediato os possíveis danos estruturais, provocados pelas sobrecargas decorrentes das alterações no piso suportado pela cúpula.

As ferramentas digitais, aliadas à estática gráfica, permitiram trabalhar vários cenários de carga, a que a cúpula podia ser sujeita. Foi assim possível de forma célere e sem o recurso a cálculos complexos apurar se as alterações de função e redistribuição de usos, produziam algum assentamento ou dano, devido à colocação de sobrecargas incompatíveis para esta estrutura.¹⁶

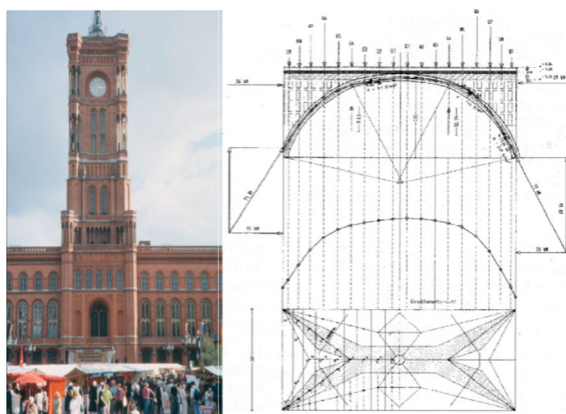


Figura 4.27 – Análise da capacidade estrutural da cúpula que suporta o piso reformulado

(“El Diseño Estructural por medio de los Métodos Gráficos – Resumen”, 2004)

4.5.1 Axiel Kilian

Axiel Kilian desenvolveu um modelador digital de formas funiculares, produzidos por cabos suspensos inspirado nos modelos físicos de Antoni Gaudí. Esta abordagem

¹⁶ Cf. Döring, W.(1995) *Konstruktion und Form*. Stuttgart; Kohlhammer Verlag; Führer, W.(1995) *Der Entwurf von Tragwerken*. Köln: Rudolf Müller Verlag; Jacobo, G. (1995-1996; 2000-2001) *Pasantías de Investigación en el Institut für Tropentechnologie-Fachhochschule Köln*, Alemanha; Leder, G. (1985) *Hochbaukonstruktionen – Band I: Tragwerke*. Berlin: Springer Verlag.

digital permite uma manipulação qualitativa, gráfica, gerindo as superfícies curvas das superfícies parabólicas, a partir de catenárias.

O foco do seu trabalho é a criação de uma ferramenta interativa, que permita em tempo real, obter os traçados necessários para produzir uma fabricação digital de modelos físicos de formas antifuniculares. (Kilian, n.d.: 2)

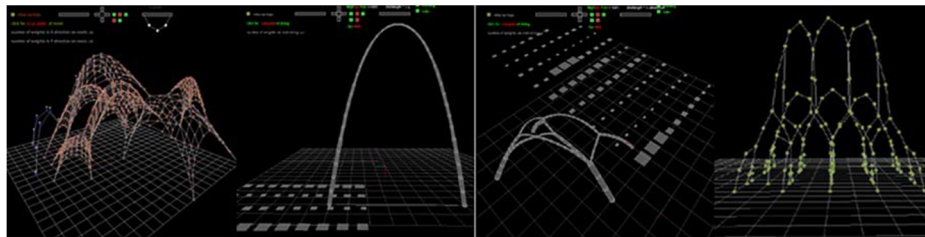


Figura 4.28 – Overview of the tool, showing mesh and string models as well as flattened patterns linked to the live form finding model
 (“Linking Hanging Chain Models to Fabrication”, n.d.)

Os traçados são consequência de um processo iterativo, resultando da manipulação da catenária e do modo como se traduz a forma volúmica, por exemplo, sendo produzidos uma série de pequenos modelos. Este processo permite a obtenção de formas antifuniculares passíveis de serem materializadas através de estruturas de superfície-ativa (cascas).

A metodologia revela não só uma grande eficiência na gestão geométrica das superfícies de dupla curvatura, como também evidencia a sua otimização estrutural.

As soluções estruturais baseadas no equilíbrio podem ser dimensionadas, caso seja mantida a distribuição proporcional da massa, sendo a geometria das linhas de força dimensionada proporcionalmente. Esta condição mantém-se verdadeira mesmo que a massa não seja escalada proporcionalmente às dimensões geométricas. (Kilian, n.d.:4)

O modelo digital não apresenta as limitações do modelo físico, aquele ao contrário deste permite através da edição da geometria efetuar em simultâneo os processos de avaliação e de criação.

A avaliação dos modelos físicos, pelos meios que envolve, pode desvirtuar o valor obtido, sendo que no modelo digital não só não existe este risco, como também os

condicionalismos materiais não se fazem sentir, uma vez que a divisão do funicular em mais partes ou num modelo mais complexo, pode reduzir a velocidade do processo.

O uso de técnicas generativas permite uma manipulação das formas e da complexidade dos funiculares, observando-se em simultâneo o seu comportamento, sem que seja necessário investir tempo na sua construção física.

A secção transversal da peça deve fornecer a área suficiente para assegurar o transporte das forças que caminham ao longo do material. A otimização do material em função da secção transversal, isto é, o ato de conseguir um trabalho interno constante através da variação dimensional da secção do material, é algo que é possível de se obter através de processos gráficos. (Kilian, n.d.: 5)

4.5.2 Philippe Block

Block durante a sua tese feita no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, sob a orientação de John Ochsendorf, desenvolveu um processo que utiliza diagramas de esforço, para mapear a rede de fluxo das forças de abóbadas históricas.

O novo método permite entender a três dimensões os sistemas funiculares ¹⁷. Uma vez que este trabalho apresenta uma nova metodologia para gerar superfícies através de uma malha de forças, é assim possível manipular estruturalmente formas de abóbadas para que funcionem à compressão pura.

O método encontra possíveis soluções funiculares sob carga gravitacional dentro de um envelope construtivo definido. Com recurso à “geometria projetiva”, teoria da dualidade e otimização linear, o software fornece um método gráfico e intuitivo, tirando partido das vantagens intrínsecas às técnicas gráficas de análise estrutural. (Block, 2007)

O método de análise produzido por Philippe Block, a referida “geometria projetiva” faz uma abordagem aos problemas estruturais de um modo tridimensional, com recurso às

¹⁷ Cf. Block, P. (2007) “Thrust Network Analysis: a new method for understanding three-dimensional funicular system.”. MIT. Accessed 2017 < <http://web.mit.edu/masonry/thrustNetwork/#ABSTRACT2> >

ferramentas digitais. Deste modo a superfície é dividida numa malha, cuja análise é processada digitalmente com base na estática gráfica.



Figura 4.29 – Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa, Portugal, 1499-1528; King Henry VII's Lady Chapel, Westminster Abbey, Londres, Inglaterra, 1503-1519; Pfarrkirche, Königswiesen, Áustria, 1520
(Block Phd, 2009)

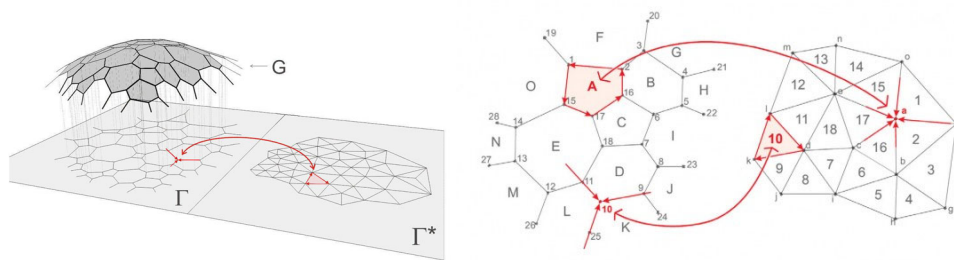


Figura 4.30 – Thrust Network Analysis, a grade primária (Γ) e a grade dual (Γ^*) estão relacionadas por uma relação recíproca. O equilíbrio do nó é garantido pela existência de um polígono fechado
(BRG “Thrust Network Analysis”, 2007)

A análise feita pela TNA produz um mapeamento da rede de forças planares, o que permite gerar automaticamente um traçado que representa o fluxo das referidas forças ao longo da superfície concebida, permitindo deste modo perceber, mediante a análise nodal, o equilíbrio estrutural da superfície.

Todas as informações sobre a topologia das malhas de análise, são referenciadas por coordenadas locais correspondentes à superfície de impulso, i.e., a linha de ação da força, que representa a forma ideal para superfícies à compressão.

O input produzido pela geometria das superfícies curvas e das condições de carregamento, gera um output que permite a compreensão da informação, expressa mediante análise tridimensional.

Esta ferramenta apresenta-se sob a forma de um *plug-in*, compatível com o software de modelação já existente. O software por sua vez permite visualizações claras dos resultados da análise feita à forma concebida, logo este processo permite uma manipulação consciente da forma de um modo interativo, integrando a análise estrutural no processo de conceção.

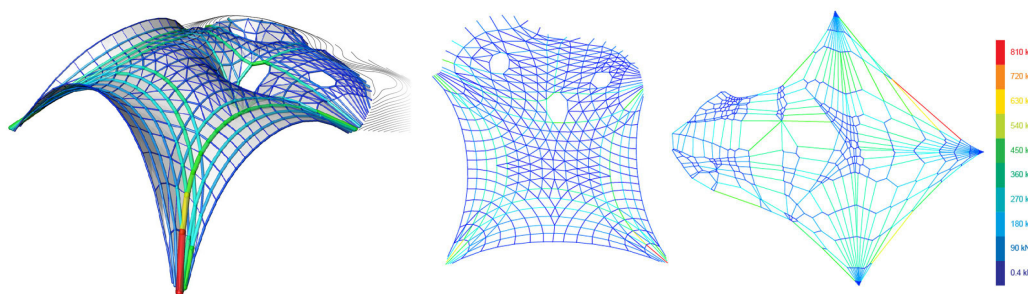


Figura 4.31 – Análise produzida pelo RhinoVault para a abóbada de alvenaria de pedra MLK Jr., Austin, TX, USA, 2010-2013
(BRG. "Thrust Network Analysis", 2007)

Esta série de imagens mostra diferentes formas de equilíbrio possíveis utilizando apenas compressão, intentando-se a partir de uma grade ortogonal regular gerar uma configuração simples em forma de almofada, ao adicionar graus sucessivos de complexidade. Para cada exemplo, a relação entre a geometria dos padrões de força e as forças internas no sistema (representado no diagrama recíproco) é visualizada graficamente.

Este software usa diagramas recíprocos, que permitem um método intuitivo e rápido, apresentando uma grande facilidade de leitura devido ao interface gráfico, oferecendo por isso uma análise fiável e global do comportamento tridimensional das peças.

Este modelo de concepção apesar de suportado por ferramentas digitais, aproxima-se, nos seus princípios do modelo conceptual utilizado por Heniz Isler, o qual por sua vez apresenta pontos de contacto com os processos BIM (Building Information Modelling). (Block, 2009) uma evidência de que a evolução, mesmo se disruptiva, não tem por isso de prosseguir em rutura com o aquis conceptual e civilizacional da Arquitetura, em virtude desta visão operativa holística e global.

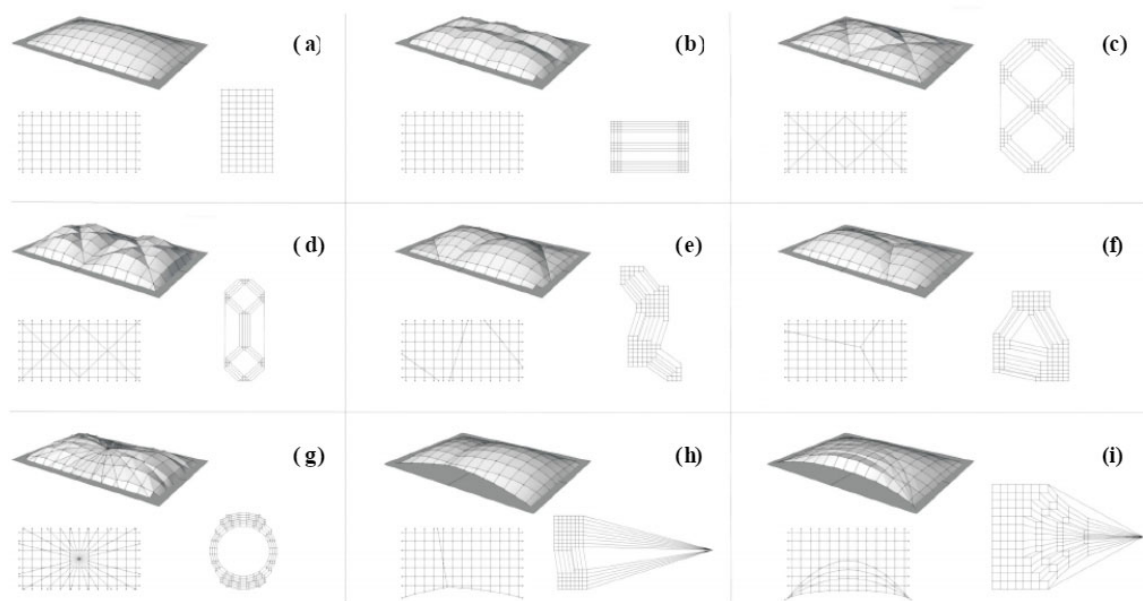


Figura 4.32 – Manipulação formal da superfície a partir de uma malha retangular

("thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium",2007)

Capítulo 5 – Aplicação da tecnologia digital em arquitetura

5 Preâmbulo

Este capítulo procura compreender as consequências dos processos e ferramentas digitais na prática da arquitetura. A evolução e a crescente sofisticação dos meios digitais, bem como a sua vocação para suportar um processo de conceção integrado e interativo, tem vindo a produzir profundas alterações nos ciclos da Arquitetura, com impactos no tempo de realização e nas possibilidades de projeto.

As transformações passam, quer pelo desenho, que evoluiu para um conceito mais abrangente como o da representação, quer pela forma que passa a definir-se por processos de formação.

A evolução contínua das ferramentas tem vindo a definir novos modelos de conceção digital, concretamente, a “*primeira era digital*” produziu alterações significativa no âmbito teórico, tecnológico e metodológico, designadamente os modelos de formação, topológicos e associativos, os quais serão sucessivamente, objeto de análise.

5.1 Modelos de representação – alográfico e autográfico

Kolarevic reflete sobre o papel do arquiteto no processo de construção, ao longo dos tempos, tratando-a como a “história da dissociação” (2003: 57), onde faz uma distinção entre dois momentos: num primeiro, o *Desenho*, enquanto veículo de representação do processo conceptual, seu desenvolvimento, análise, bem como comunicação da solução e, num segundo momento, o da *Construção*, *conglobando aí aquelas* tarefas que consubstanciam a “manifestação física do objeto projetado”.

Mitchell William (1944-2010) sobre a relação do desenho com a construção afirma que “*os arquitetos tendem a desenhar aquilo que podem construir, e a construir aquilo que podem desenhar*” (2001: 354). Este binómio, que em qualquer dado momento poderia revelar-se redutor, adquire particular importância para a prática do arquiteto, sempre que as transformações produzidas quer a nível das metodologias quer do Desenho quer da Construção, permitem expandir as possibilidades arquitetónicas, deste modo alterando enormemente o respetivo potencial inicial.

Os mestres-pedreiros, numa das suas variantes, o equivalente profissional medieval dos arquitetos contemporâneos, concentravam em si, as funções do “arquiteto, do engenheiro e do cientista” (Kieran and Timberlake, 2004: 27) do iniciado, se se quisesse, por oposição ao profano.

Estes profissionais davam expressão física ao seu modelo mental do edifício, tendo para isso a necessidade de intervir diretamente, não só na execução da obra, como também na coordenação dos outros artesãos.

O método de trabalho explicitado expressa um modelo autográfico de representação, no qual quem concebe também constrói. Logo, o conhecimento dos processos e técnicas encontra-se seminalmente implícito e intrínseco à conceção da arquitetura (Carpo, 2011: 16). Neste modelo, o desenho e a construção partilham o mesmo espaço e tempo de ação. Os meios de índole manual afirmam-se por “*pensar através da ação*” (Dormer, 1994: 8), sendo mesmo a única conexão entre a intenção e a expressão (Dormer, 1994: 9).

O Renascimento Italiano (no séc. XV) trouxe consigo um progresso técnico e científico sem par na história; Jean Delumeu¹⁸ (1984: 23) afirma que “*o Renascimento foi, especialmente, progresso técnico (pois) nunca no passado da Humanidade tinham surgido tantas investigações em tão pouco tempo*”.

Neste período coexistem duas lógicas no exercício profissional da arquitetura. Uma primeira, segue a tradição medieval do mestre-pedreiro, cuja formação resulta de um processo de aprendizagem em contexto oficial, de uma relação mestre/aprendiz. Trata-se de ensino essencialmente de carácter prático, que tinha como domínio disciplinar, a tectónica da construção, a pintura e a metalurgia, representando esta corrente, projetistas como Filippo Brunelleschi (1377-1446), Michelangelo (1475 -1564) e Leonardo da Vinci (1452-1519).

A outra corrente é já reflexo do novo tempo, que se percebia chegar, afastando-se da abordagem prática e empírica da tradição medievais, pouco sistemática, adotando já o

¹⁸ Jean Delumeau. A civilização do ' renascimento volume 11. 1984. Editorial estampa lisboa. Índice. Volume II. Cap. X

que viria a ser o modelo iluminista, baseado numa educação clássica¹⁹ e na cultura do desenho, como base conceptual.

Leon Battista Alberti (1404 -1472) que pode ser considerado como referência máxima desta corrente, contribuiu para a fundação disciplinar da arquitetura, com o seu texto seminal *“De re aedificatoria”*, publicado em 1485.

Aí, Alberti advoga o desenho bidimensional como ferramenta de representação e de conceção da arquitetura. O desenho deve ser considerado como o suporte do novo paradigma de conceção/construção na arquitetura. O rigor e a exatidão dos desenhos técnicos servia para comunicar as suas ideias e processos materiais e de construção às suas equipas de construção do projeto. Para ilustrar o novo processo metodológico, Carpo afirmou, inclusive que *“o que não pode ser registado não será transmitido, e o que não é nem registado nem transmitido não pode ser imitado”* (2011: 13); nem lembrado, acrescentar-se-ia.

O exercício da arquitetura passa a ser suportada pela teoria, o ensino passa a ser sistemático e de carácter tratadístico, afastando-se do conhecimento prático; Kolarevic refere ilustrativamente que *“a teoria serviu para providenciar a essência da arquitetura, e não o conhecimento prático da construção”*. (2003: 57)

A conceção assenta no ato de representação que o desenho cauciona. O desenho permite a descrição dos futuros edifícios, o seu rigor e exatidão determinando a eficácia da descrição do edifício e a transmissão das intenções de projeto na passagem à construção, passando a ser o elo de interligação entre a conceção e a construção.

A necessidade da comunicação das ideias para a execução física e material do objeto, configurou a criação e o desenvolvimento de um léxico de convenções gráficas, surgindo assim a representação perspetiva e gráfica da peça arquitetónica. Esta visão permitiu a passagem do modelo autográfico para uma abordagem alográfica, deste modo afastando o arquiteto da obra (Carpo, 2011:16). Este momento marca a separação do desenho em relação à construção, já que ambos passam a poder ocorrer em ciclos distintos, com sujeitos distintos, que podem ter âmbitos de atuação distintos e, ser mesmo, independentes entre si.

¹⁹ Renascimento italiano, marcado pelos valores da Antiguidade clássica greco-romana, reinserindo e contextualizados nos princípios humanísticos na sociedade vigente.

A separação de tarefas acarretou a separação de profissões, passando o artesão ocupar-se da construção física do retrato mental que o arquiteto detém da peça arquitetónica. O desenho é primordial neste processo, tratando-se nas palavras de Pye de “*uma declaração da forma ideal do objeto a realizar*” (1995: 31) pela qual, de acordo com os princípios *albertianos*, o mérito do artífice seria aferido pelo do grau de aproximação do objeto manufaturado à ideia original do arquiteto.

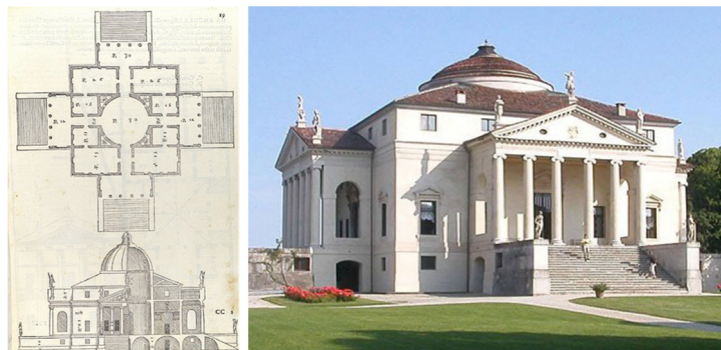


Figura 5.1 – Villa Almerico e representações gráficas, Andrea Palladio
 (“Biografia do Arquiteto Andrea Palladio”, n.d.)

O modelo alográfico emerge com os processos de representação disponibilizados pela evolução dos processos gráficos. Este posicionamento intelectual mostra-se suportado através da representação gráfica para a produção do objeto. O processo de representação medeia o ato ideativo, permitindo que quem concebe não construa e, deste modo que a dimensão tecnológica da arquitetura possa tender a afastar-se do ato ideativo algo que começa efetivamente tendência a verificar-se.

Neste paradigma metodológico, quem ideou a peça arquitetónica deixa de tomar parte na sua execução e o *saber fazer* é substituído pelo saber escolástico. Tal implica que o ato de fazer possa nalguns contextos ser substituído pelo ato de pensar. O conhecimento empírico feito de experiência é substituído pelo saber tratadístico. O esforço manual é substituído pelo esforço intelectual.

O mestre pedreiro – operário qualificado, passa a arquiteto – “intelectual”. É certo que o ênfase no ato de pensar não pode ser visto, só por si, como contendo exclusivamente conotações negativas, contudo, o facto de o mesmo passar a existir desligado do

contexto construtivo retira ao intérprete, maxime ao arquiteto, o domínio e, por isso a capacidade de ser ele a exprimir a abstração da (sua) ideia através da materialização tectónica.

O afastamento do arquiteto da obra traduziu-se numa perda de conhecimento no domínio do ciclo construtivo. Este distanciamento foi igualmente negativo no capítulo estrutural; com efeito, a falta de contacto com o processo construtivo, limitou a compreensão dos fenómenos decorrentes do manuseamento da matéria e das potencialidades expressivas das formas arquitetónicas. O arquiteto ao perder conhecimento do processo construtivo, perdeu assim conhecimento do funcionamento estrutural.

O desenvolvimento dos recursos gráficos introduziu entropia no processo conceptual, decorrente do afastamento metodológico da conceção face ao ciclo de construção, consequentemente gerando um processo metodológico sequenciado, com pouca ou nenhuma interação com o espaço e os materiais.

Além disso, a referida entropia e distanciamento, cria um desfasamento progressivo no tempo, entre o pensar/idear e o construir/concluir, tornando-o deste modo mais desarticulado, moroso, ineficiente e atreito a erros e omissões.

Porque quem concebe está longe da realidade construtiva, o arquiteto perde por isso a aptidão de pensar de imediato, em tempo real, na consequência material da ideia representada a concretizar no espaço.

Assim, quando a representa, expressa apenas uma realidade tipificadamente localizada, cuja generalização pode deparar com inadequações; atente-se por exemplo no corte de uma fachada, a qual pode não ser integrável ou extrapolável para a restante realidade construtiva do artefacto arquitetónico.

Esta metodologia revela-se particularmente desadequada para conceção e construção de formas complexas, como é o caso das superfícies curvas e de dupla curvatura. Assim, as dificuldades de representação e modelação geométrica, o processo construtivo lento e dispendioso, afastaram da arquitetura corrente contemporânea, o fulgor e a expressividade espacial, bem como a eficiência estrutural destas geometrias.

Basta atentar a todo o período histórico anterior ao momento sob análise e relembrar a paixão e o fascínio plástico que obras como o Capitólio e as Catedrais de São Pedro ou

de São Paulo desempenharam nos seus contemporâneos e, paradoxalmente nos pensadores da época que, progressivamente abandonaram a investigação tectónica no âmbito das grandes superfícies curvas.

Numa nota mais recente, regista-se nova evolução consubstanciada no aparecimento dos computadores, o “crescimento da informação digital e as tecnologias de comunicação”, tiveram impactos quer no *Desenho* quer na *Construção*. Com efeito, o emergir da “Era da informação,...” “...tal como (n)a Era Industrial precedente, desafia não só como desenhamos os edifícios, mas também como os manufaturamos e os contruímos”. (Kolarevic, 2003: 3)

A introdução dos meios digitais produziu alterações na conceção e na comunicação do projeto, sendo que o Desenho deixa de ser o único veículo mediador entre a ideia e a construção. Com o tipo de meios referido, passa a ser possível, a partir da digitalização de maquetas e modelos físicos, incorporar essa informação no ciclo de projeto. Deste modo deixa-se de falar em Desenho para se passar a falar em Representação.

O processo tido como *Representação* (desenho e maquetas) veio produzir profundas alterações no ciclo de conceção em Arquitetura pois, a introdução das ferramentas digitais nos processos de Desenho e Construção permite estabelecer um novo paradigma.

Com efeito, a evolução das ferramentas de representação passou a possibilitar a execução digital da peça arquitetónica, passando-se deste modo de uma ferramenta que produz linhas, para uma ferramenta que produz um modelo digital, com consequências profundas nos processos operativos, mentais, cognitivos e metodológicos, pois passamos da representação da ideia, para uma materialização da ideia, embora em contexto digital.

No processo anterior, baseado numa sequência alográfica, o ciclo iniciava-se com a ideia, passando para a exploração gráfica, através do esquiço e, com este, desembocava-se numa fase de representação gráfica rigorosa bidimensional, (maxime, desenhos de obra) assim se possibilitando a materialização do projeto, i.e., a peça arquitetónica.

No novo ciclo, gerado pelos meios digitais associados ao projeto, possibilita-se um “novo processo autográfico”, o qual se define a partir da ideia, passando à respetiva representação, através da exploração gráfica, desta passando ao esquiço e, daí ao

esquício digital e à digitalização de modelo físico. O passo seguinte leva-nos daqui à construção de um modelo digital da peça arquitetónica, deste à prototipagem digital e, com a gestão informação gráfica do modelo digital, aos desenhos de obra, atingindo-se finalmente a materialização do projeto através de processos manuais, mecânicos ou digitais.

No modelo alográfico, a representação da ideia é feita através de uma caracterização pontual, recorrendo a processos gráficos de representação, pelo que a peça era assim comunicada de um modo genérico. Na materialização digital da ideia, não existe uma convenção ou processo gráfico de suporte, a ideia é toda ela construída, apenas que, em ambiente digital, isto é, deixa de se representar graficamente de forma bidimensional para passar a construir-se tridimensionalmente em suporte digital; deste modo, o desenho como o conhecemos deixa de ter o exclusivo da comunicação da ideia.

O “*contínuo digital*” rompe com o modelo alográfico de representação já que a comunicação da ideia mental é feita através de uma construção digital do objeto ideado.

Quem concebe também constrói a peça em ambiente digital, não se tratando de uma representação, mas antes de uma ideia que se expressa através de uma materialidade digital, da qual emerge uma tectónica digital e um novo modelo, por isso, já não alográfico mas autográfico.

O processo metodológico disponibilizado pelo CAD/CAM na qual a modelação, produção e construção estão integradas através de ferramentas digitais, tornou possível em tempo real, modelar um objeto e estabelecer o respetivo processo e materialização, tectónicos.

O “*continuo digital*” mudou de novo a relação entre o desenho (agora representação) e a construção ou, como bem explicitou (Carpo, 2011: 32) os processos definidos por este paradigma “*evocam um estado autográfico ideal e original*”. O arquiteto regressa ao modelo *pré-albertiano*, já que a integração das tecnologias CAD/CAM passou a permitir que o ato de desenhar (entendido como conceber) e o ato de construir, resultem do mesmo agente.

O novo paradigma torna o arquiteto do sec. XXI um construtor digital, em parte como os mestres-pedreiros seus antecessores. Existem, contudo, diferenças que decorrem dos processos de produção. O processo tecnológico criado permite beneficiar em

simultâneo da “*produção de risco*” (a condição manual) e da “*produção de certeza*”²⁰ (a condição mecânica ou industrial). Assim, a condição manual, capaz de acolher as possibilidades de personalização, beneficia do grau de proficiência da condição industrial, a qual garante um resultado pré-determinado, por outras palavras, como *disse* (Kolarevic, 2003: 52) “*a variedade já não compromete mais a eficiência e a economia da produção*”.

A flexibilidade e destreza deste processo permite a conceção e construção de objetos com elevado grau de complexidade de modo económico e eficaz, sem recorrer à estandardização. As formas complexas podem ser visualizadas e analisadas antes da sua fabricação, em ambiente digital, sendo assim possível a sua otimização.

Os métodos de personalização em série permitem a “fabricação diferenciada” com recurso a alterações controladas digitalmente sem perda de celeridade e competitividade.

Este novo paradigma permite antever um futuro que “...*representa um retorno às nossas raízes industriais, antes de a arte ser separada dos artesãos, quando a produção...*” do *artefacto arquitetónico* “... *era feita para os indivíduos ao invés das massas*”. (Gershenfeld, 2007: 8)

A personalização em série consente alterar o carácter da produção, permitindo adotar princípios para “soluções e componentes únicos”, através da informação digital, pelo que é assim possível produzir objetos em massa com “geometrias complexas” e variáveis. Este modelo tecnológico abre o caminho para uma renovação e expansão do vocabulário formal da arquitetura (Sousa & Duarte, 2005: 222) que permita a abordagem das superfícies curvas de dupla curvatura.

5.2 Evolução das ferramentas CAD

O mundo académico despertou para o uso do computador no projeto arquitetónico na década de 60 do séc. XX. Ivan Sutherland, em 1963, no âmbito da sua tese de doutoramento desenvolveu um modo de integrar diversos programas de análise,

²⁰ segundo Pye (1995: 9), a “produção de certeza” caracteriza-se pela sua capacidade de garantir um grau de qualidade do resultado pré-determinado, indo para além do controlo do operativo

na realização de projeto, consubstanciando e nomeando o “moderno conceito de CAD”, (projeto auxiliado por computador) – *Computer Aided Design*.

O software *Sketchpad* demonstrou que os computadores poderiam auxiliar e fazer pelo menos parte dos processos de desenho, modelação e representação.

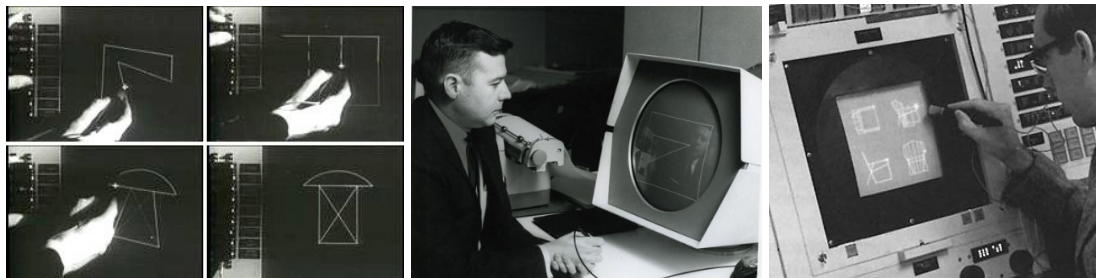


Figura 5.2 – Sistema Sketchpad, Instituto de Tecnologia de Massachusetts
 (“História da computação gráfica: Sketchpad” n.d.)

A evolução tecnológica fez com que os processos computacionais passassem de uma ferramenta auxiliar de projeto, para serem hoje em dia parte integrante do processo de projeto arquitetônico. As várias gerações do CAD têm vindo a modificar os meios e processos de projetar em arquitetura.

A *primeira geração* CAD, no âmbito da engenharia, permitiu a modelação de curvas complexas, para as indústrias automóveis e aeroespaciais. Já na arquitetura, veio ajudar na modelação geométrica dos edifícios, ao possibilitar manipular as construções geométricas dos projetos. Para o efeito, requeriam-se grandes máquinas para suportar a computação intensiva necessária à efectuação dos cálculos. Logo, a difusão do CAD só foi possível com o aparecimento do computador pessoal, tornando a sua utilização mais acessível e mais barata.

A *segunda geração* CAD tinha como principal foco o desenho e a modelação arquitetónica, aproximando-se do conceito de desenho auxiliado por computador, i.e., *Computer Aided Drawing ou CAD*. *Através desta ferramenta*, a representação sofreu um forte desenvolvimento, tendo-se contudo perdido o uso do computador como ferramenta de análise do projeto ,(elo seu foco na dimensão representação que a ferramenta agora assume, relegando a dimensão conceptual, existente no anterior modelo do Design.

A terceira geração CAD, porém, caracteriza-se pelo desenvolvimento de softwares que resgatam o foco no suporte do projeto; estes são concebidos para a parametrização de componentes arquitetônicos (como paredes, portas ou janelas), permitindo manipular as suas qualidades geométricas e dimensionais. A isto, acresce o aparecimento de softwares destinados à análise da peça arquitetônica como por exemplo, estruturas, desempenho energético ou estimativa de custos.

As tarefas realizadas com recurso a processos tecnológicos vieram alterar os meios e o modo de conceção, utilização e construção da arquitetura pois a computação tem através do tempo demonstrado a capacidade de criar novas ferramentas e abarcar novas tarefas.

Chegados à quarta geração, esta demonstra as novas capacidades que estes meios vêm progressivamente a englobar, não só já no campo da representação e avaliação do objeto arquitetónico. Sobre o assunto, Oxman, 2005: 230 considera que estes recursos vêm essencialmente produzindo profundas mudanças conceptuais no exercício da prática arquitetónica. Estas refletem-se na relação entre os projetistas e os meios digitais, marcando com isso a substituição do projeto suportado por computador – *Computer Aided Design (CAD) pelo Projeto arquitetónico – Digital Architectural Design (DAD)*.

A conceção suportados por malhas, repetição, geometria cabalística, simetria, tipologia e produção em massa, são substituídas por relações topológicas - de proximidade, continuidade ou interligação, gerando transformações dinâmicas ao nível da hierarquia, da funcionalidade, da separabilidade ou da conexão.

Os conceitos como, estável, sólido, duradouro e estandardizado veiculados pelos processos tradicionais de conceção, são agora substituídos pelos de variedade e variabilidade, singularidade e multiplicidade, que os novos meios possibilitam. A conceção e a produção dos edifícios estão em mudança, com consequências no corpo de conhecimento, nos processos metodológicos cognitivos e na prática da arquitetura.

Os novos meios permitiram a realização de peças arquitetónicas impossíveis de conceber, representar ou construir sem a sua existência. As arquiteturas digitais encontram suporte dos novos meios informáticos, no âmbito da conceção, construção e fabricação, exponenciando as possibilidades formais e conferindo novas dimensões ao projeto de arquitetura. O Desenho que tornava a obra possível, isto é, que informava

a obra, foi agora substituído pela *Informação, que se torna no aspeto essencial dos processos de conceção digital.*

Oxman, (2005: 234) sobre estas questões conclui, expressando o espírito da era digital: Esta mudança de paradigma operativo está a produzir alterações profundas à escala global ao nível da cultura, da sociedade, da economia.

Nesta nova realidade, as formas curvas de alta complexidade foram o veículo para a entrada das arquiteturas digitais no contexto arquitetónico mundial. Estas realizações apresentam uma abordagem múltipla, inovadora, pela facilidade com que se torna possível, abordá-las e manipulá-las, não sendo ainda possível, contudo, enquadrá-la num movimento com uma abordagem coesa.

Kolarevic (2005) salienta que as mudanças não são apenas no universo formal; o uso das tecnologias digitais permite agora gerar e construir formas complexas com um tempo e um custo razoáveis. As informações, obtidas através de dados podem ser trocadas, extraídas e integradas. Os processos de projeto tornaram-se mais racionais, mais integrados e bastante mais complexos, alterando a relação entre o arquiteto e os diferentes momentos do projeto, mormente, no âmbito da respetiva análise, síntese, avaliação e comunicação/representação.

A realização da visão própria e ímpar do arquiteto, implica muitas vezes transcender os limites dos programas, o que envolve a customização das aplicações digitais. Assim, aprender a programar, abre a possibilidade de criar novos modos de expressão, criando novas ferramentas, sistemas e ambientes.

O uso do computador e dos processos de computação permite a criação em processos interativos e mais rápidos, de formas complexas, das quais as superfícies curvas e de dupla curvatura são um exemplo, o que motiva a adesão a estas ferramentas no processo criativo.

O computador deixa de ser uma mera ferramenta de produção, na visão de Reas e McWilliams (2010) para passar a ser um parceiro conceptual, pois as suas potencialidades permitem agora produzir novas formas e expressões artísticas.

5.3 Projeto arquitetónico digital

As ferramentas digitais rompem como os processos de conceção tradicional, permitindo ao longo das últimas décadas a produção de peças únicas. Com efeito, quer a inovação formal, quer espacial representam aspetos diferenciadores, que têm vindo a sedimentar e a homologar a cultura digital. Estes permitem enquadrar uma mudança face ao paradigma da forma mais tradicional de pensar (o projeto de) arquitetura.

O novo quadro instrumental, que as ferramentas digitais têm vindo suportar, estimula o aparecimento de novas práticas e o desenvolvimento de novas metodologias de projeto. Esta pesquisa intelectual levou a desencadear várias tentativas de teorizar e de mapear este fenómeno, sobre o qual surge se coloca a questão central de *“saber se existe uma nova metodologia, um novo paradigma cognitivo e conceptual, ou se estamos perante um projeto convencional feito com novos meios”*. (Oxman, 2005: 230)

O número de realizações crescente da arquitetura digital e a sua novidade metodológica têm vindo a despertar o interesse da comunidade científica e profissional, numa quantidade crescente de eventos internacionais, de publicações e conferências sobre este tema.

Este interesse demonstra a pertinência que a prática e a teoria dos métodos digitais ocupa no âmbito do projeto de arquitetura, tentando explicar e teorizar o carácter da transição e a evolução da prática e da teoria do *projeto digital*. (Oxman, 2005: 234)

Não obstante a qualidade e quantidade do corpo literário que se constitui e da quantidade de projetos produzidos, a diferenciação metodológica relacionada com a prática digital ainda não apresenta a solidez desejada.

A conceção e produção dos edifícios baseada no desenho em suporte de papel, passa agora a ser realizada, como se disse, através de informação digital.

William Mitchell (1995) constata que os edifícios são atualmente projetados, *“documentados, fabricados e montados”* mediante suporte digital, o que permite assim caracterizar a arquitetura da *era digital* através da sua inerente complexidade, a qual se mostra por isso capaz de responder com grande eficiência às exigências de projeto, lugar, programa, intenções expressivas, complexidade formal e personalização.

Para Mitchell (1995) estas questões colocavam-se também ao *modernismo industrial*; a diferença entre estas metodologias e as ferramentas digitais, decorre da capacidade de

interligação entre o projeto e a materialização, realidade operativa que as *arquiteturas digitais* apresentam ainda durante o ciclo concetual.

A reprodução ou repetição foram os elementos normativos de suporte da *era da industrialização*. A exposição realizada em 2003 no Centro Pompidou designada *Non-Standard Architectures*, colocou em evidência que o novo fenómeno, designado por “projeto digital” tem como grande foco teórico o conceito de “projeto não-padronizado”, “não-normativo” e “não-repetitivo”.

Temos assim que, ao invés da visão mais convencional da arquitetura, em que o seu intérprete procurava repetir, padronizar ou remeter a cânones nos quais se pudesse apoiar, o novo paradigma procura personalizar, individualizar, em sùmula, procura a criação de uma linguagem própria, que pode ser do projetista, do consumidor, de uma época ou para uma época.

Oxman (2005) faz por isso ressaltar que o carácter revolucionário do projeto digital não resulta da formalização, mas propõe e corporiza a “diversidade, a diferenciação e a evolução dinâmica”, uma vez que as ferramentas computacionais sustentam “tipos avançados de geração da forma”, pelo que são as geometrias complexas e topológicas a influenciar as características formais do projeto.



Figura 5.3 – Aplicação do Sistema CATIA, museu Guggenheim
(How Analog and Digital Came Together in the 1990s Creation of the Guggenheim Museum Bilbao, n.d.)

F. Gehry, no projeto do museu Guggenheim Bilbao conseguiu plasmar a potencialidade que vinha sendo intuída no âmbito da teorização das novos caminhos formais, postulando novos métodos de projeto (como a Catia) e jogando deste modo com a elevada complexidade das geometrias libertas de formalismos estilísticos.

Em função desta circunstância, Gehry parece refletir ainda um elevado compromisso na pesquisa do potencial das diferentes ferramentas possibilitadas pelas novas tecnologias

digitais, na prática do projeto. Estas experiências estabeleceram os precedentes para a utilização dos sistemas computacionais integrados, no âmbito da conceção, produção e construção.

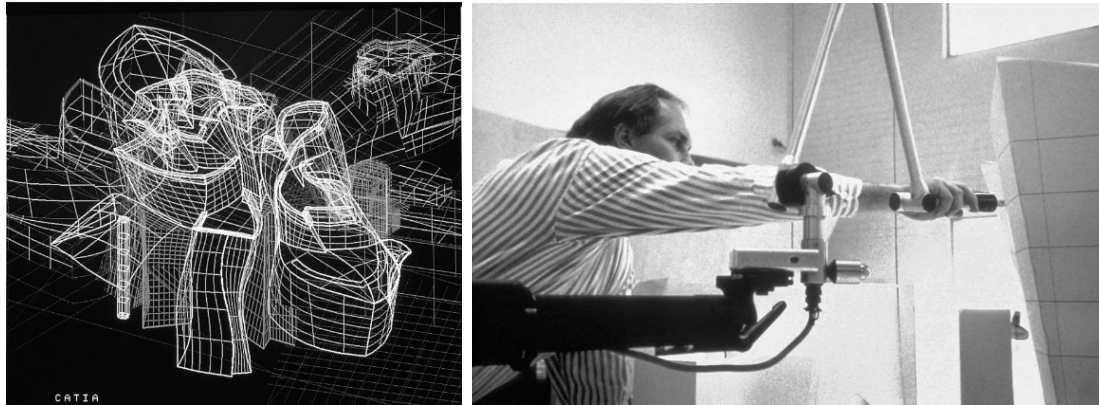


Figura 5.4 – Sistema Catia permite a transposição dos modelos físicos para uma informação gráfica digital
(Grey, G -A Fish Is Kind of Aerodynamic, 2008)

Nicholas Grimshaw na Estação Waterloo apresenta um dos primeiros projetos lineares curvos não repetitivos, que viria a estar muito em voga na década de 90 do séc XX. O edifício é sinuoso, gerando um curvo contínuo em vidro. Para a sua conceção foram aplicadas técnicas paramétricas, algorítmicas, que se vieram a tornar comuns nos projetos contemporâneos.

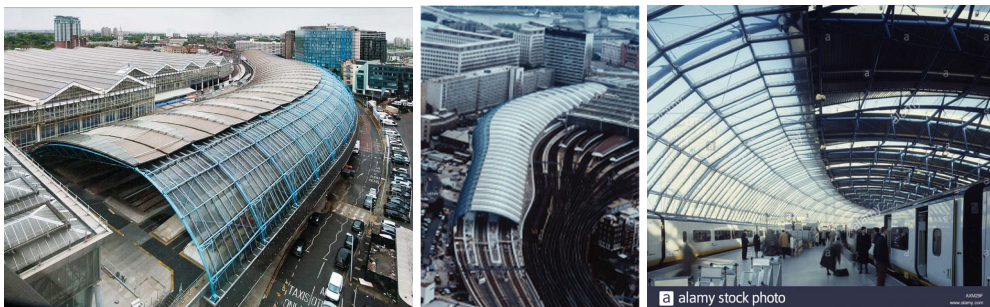


Figura 5.5 – Estação Waterloo, Londres Inglaterra, 1994 Nicholas Grimshaw
("Londres Accessed", n.d.)

Na busca de novos paradigmas conceptuais devemos ainda registar o trabalho realizado pelos Foreign Office Architects, o Terminal Portuário Internacional de Yokohama, expressa a complexidade formal, de geometrias de “híper-continuidade” e topológicas, impraticáveis sem um correto apor digital.



Figura 5.6 – Terminal Portuário Internacional de Yokohama, Japão, Foreign Office Architects, 2002

(“Clássicos da Arquitetura: Terminal Internacional de Passageiros De Yokohama”, 2018)

Conclui-se assim que o desígnio da Arquitetura se mantém inalterável – o Habitar, e que a formulação do *Problema* em projeto (lugar–programa–técnica) tem um carácter trans-períodológico. Já os processos de conceção e a metodologia são condicionados pelos meios e pelo conhecimento. O riscador que traçava a geometria cabalística, suporte operativo para a conceção espacial dos edifícios da idade média, sofre o devir da tecnologia e do conhecimento.

5.4 Evolução dos processos de conceção digital

A representação do processo de projeto tradicional é normalmente efetuada por um diagrama cíclico linear, progressivo. Contudo, a necessidade de expressar e identificar as subfases e subáreas do processo de conceção, tornaram o esquema mais próximo de um esquema taxonómico.

Os fluxos de informação configuraram os diferentes processos digitais, decorrendo estes das ferramentas utilizadas, os quais podem ser sistematizadas através de um quadro analítico ou taxonomia, o qual analisa os diferentes fluxos de informação, que

podem gerar modelos de conceção digital distintos em função das tipologias das diferentes ferramentas digitais.

É possível mapear os vários processos digitais, através das diferentes atividades de projeto (e.g., representação, geração, avaliação e desempenho). Estas permitem codificar as relações e os vínculos respetivos, definindo e caracterizando o tipo de conceção digital, assim se cristalizando esquematicamente a evolução dos vários modelos da conceção digital decorrentes do referido fluxo ou padrão de informação.

Os modelos definidos permitem compreender a evolução da conceção digital, sendo assim possível também perceber as mudanças de paradigma, as potencialidades e desafios que estas ferramentas e processos apresentam.

5.4.1 Modelos de conceção e modelos de conceção digital

Os investigadores consideravam que o processo de conceção resultava de um conjunto de procedimentos interligados, que podem ser descritos como incluindo: *problema* – situação de entrada; (havendo teoricamente sempre que ter em conta a análise – apreciação dos diversos elementos, questões e programática envolvidas); *síntese* – geração/ideação; *representação* – desenho ou maquete e a *avaliação*. (Oxaman, 2005: 242)

Schon (1983) e Wiggings (1988:135-156) mais que identificar uma metodologia fundada em etapas, procuram acrescentar densidade cognitiva; o seu foco é o estudo do pensamento e dos processos de conceção do projetista.

Os modelos desenvolvidos procuravam captar a complexidade do pensamento conceptual, daquilo “*que se passa na cabeça do projetista*” (Lawson, 1997). O modelo criado designado como “*reflexão na ação*”, caracteriza o ato de conceção através de um esquema constituído por: *recepção* – percepção; *reflexão* – interpretação e *reação* – transformação. O papel da reflexão neste ciclo conceptual acrescenta uma dimensão pessoal na conceção, o pensamento desenvolvido pelo projetista.

Schon (1983) estabelece um papel central do projetista no processo conceptual, advogando que este deve ser mantido no processo de conceção digital, controlando o processo mesmo nos modelos mais complexos e integrados de conceção digital. Esta

centralidade é uma das características da concepção digital, sendo o interface do utilizador com as ferramentas digitais um dos principais focos da computação.

5.5 Modelo de Rivka Oxman

A introdução dos processos digitais na arquitetura foi estudada por Rivka Oxman (2006), na sua obra *“Teoria e projeto na primeira era digital”*. Este modelo estuda de um modo sistemático e profundo a evolução dos processos de concepção digital e as suas implicações na arquitetura.

O modelo analítico sistematiza o processo de concepção digital, através da relação do *utilizador* com as quatro classes de atividades de projeto, identificados pela autora: a *Representação* (R) relacionada com os meios digitais de comunicação do conteúdo formal do objeto arquitetónico; a *Geração* (G) que inclui processos generativos que resultam da interação com as ferramentas digitais; a *Avaliação* (E) que inclui processos analíticos de apreciação e julgamento e; o *Desempenho* (P) que abarca os processos performativos arrolados com as ponderações programáticas e contextuais. (Oxman, 2006: 242)

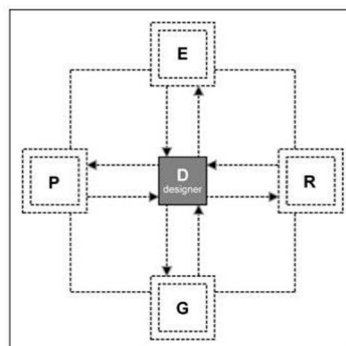


Figura 5.7 – Esquema genérico
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 242)

A análise feita à concepção digital, recorre a um esquema genérico, que através de uma representação simbólica, explica a evolução do modelo analógico base para os diferentes modelos de concepção digital. Os esquemas taxonómicos²¹ produzidos,

²¹ Taxionomia teoria ou nomenclatura das descrições e classificações científicas

identificam as alterações processuais e metodológicas, que os meios digitais introduziram no projeto arquitetónico.

O modelo base serve de quadro analítico para identificar, e.g., elementos, vínculos, relações, processos e propriedades de conceção, com o sentido de caracterizar e configurar modelos de conceção digital. Oxman recorre a cinco modelos base e as suas subclasses: *Modelos CAD*; *Modelos de Formação*; *Modelos Generativos*; *Modelos de Desempenho*; *Modelos Composto* (Oxman, 2005: 242).

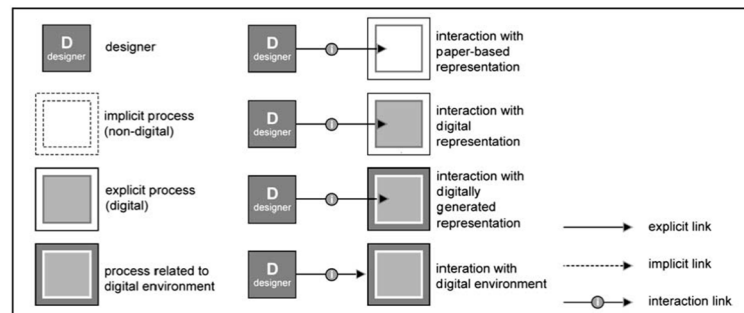


Figura 5.8 - Esquema genérico: símbolos, limites, direções
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 242)

Nos seus modelos, o projetista adota uma posição central simbólica, interagindo com os elementos de projeto situados no limite do esquema, as suas relações são representadas por um traçado, o qual expressa as relações *implícitas* e cognitivas por linhas tracejadas e relações *explícitas*, que representam as ligações computacionais são representadas por linhas a cheio.

A direção das setas indica a relação entre o utilizador e o processo, podendo ser *unidirecional* e *bidirecional*. Os limites e as setas mostram os tipos de ação entre o projetista e os meios de representação, podendo ser *interações* com os componentes e *ligações* decorrentes do fluxo de informação.

Os modelos comprovam a evolução e a crescente sofisticação dos meios digitais, bem como, a sua vocação para suportar um processo de conceção integrado e interativo ou ainda, o seu crescente impacto no tempo e possibilidades de projeto, num ciclo que compreende o processo de conceção e o processo de construção.

O projetista assume igualmente o papel de construtor das ferramentas de meios digitais personalizados. Claramente, percebe-se que o embate sobre o projeto, da “*primeira era digital*” tem sido significativo no âmbito teórico, tecnológico e metodológico.

5.5.1 Modelo conceptual com suporte em papel

Neste modelo o projetista integra implicitamente os requisitos relativos à *performance*, *geração* e *avaliação*, interagindo diretamente com a *representação* formal. E, P e G e as suas ligações com os procederes formais que revelam a parte implícita do comportamento cognitivo do projetista.

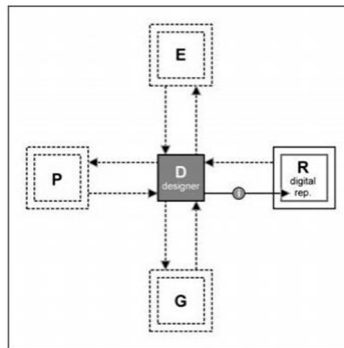


Figura 5.9– Modelo de suporte em papel
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 245)

5.5.2 Modelo CAD

A tecnologia CAD marca um afastamento do desenho sobre suporte papel e foi um marco que introduziu alterações progressivas no processo de desenho e representação, bem como nas interações do utilizador com as *atividades de projeto*.

O foco deste modelo era a representação da geometria da arquitetura, automatizando os processos, mas mantendo a lógica do esquadro e do compasso, por isso foi esta abordagem designada como modelo de representação.

5.5.3 Modelo CAD (descritivo)

A utilização tradicional do CAD consiste na manipulação de objetos digitais, sem introduzir grandes alterações qualitativas quer nos modelos convencionais de representação, quer nos modelos de conceção. (Kalay, 2004)

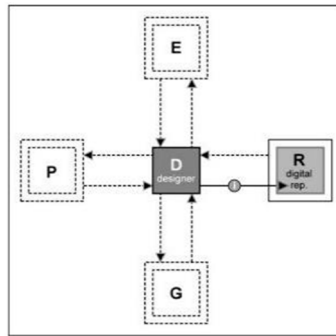


Figura 5.10 – Modelo CAD
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 247)

Os modelos CAD, são utilizados para examinar as “representações gráficas” de objetos digitais, resultando na automação do desenho e da maquete. A primeira geração CAD apresentava um carácter descritivo e consiste na representação digital de elementos 2D e 3D suportado pela utilização de softwares de modelação/representação geométrica, do qual resultavam, desenhos, modelação geométrica, “renderização” ou apresentação.

Este modelo abarca ainda os projetos suportados com recurso a impressoras 3D, máquinas de corte ou por fabricação controlada por computador – CNC.

O modelo CAD descritivo possibilitou estabelecer relações bidirecionais entre os modelos físicos e modelos digitais e, deste modo, a *modelação descritiva* integra a lógica dos materiais e dos processos de fabricação. Os modelos físicos podem ser gerados a partir de várias técnicas de processamento (Sass and Oxman, 2006) e neste caso a tecnologia permite a “conversão de modelos físicos que são capturados digitalmente através de scanner” ou rastreação por varrimento, traduzindo-os em modelos digitais, ou vice-versa. Já as ferramentas digitais, permitem que a prototipagem e a fresagem, transfiram os dados digitais para modelos físicos.

Esta evolução tecnológica, torna-se relevante quer a nível teórico, com os novos conceitos e processos conceptuais que aporta, quer a nível operativo, pois permite a integração do virtual e do material.



Figura 5.11 – Modelo e protótipo de estrutura em taça, México, 18888, Félix Candela
(Candela, Felix “Descobre ideias sobre Asas ”n.d.)

Este modelo metodológico apresenta potencial para o desenvolvimento de formas estruturais curvas. Os projetistas podem modelar a geometria das peças de modo a que estas estejam em equilíbrio, desenvolvendo apenas tensões de compressão, o que permite escalar as peças.

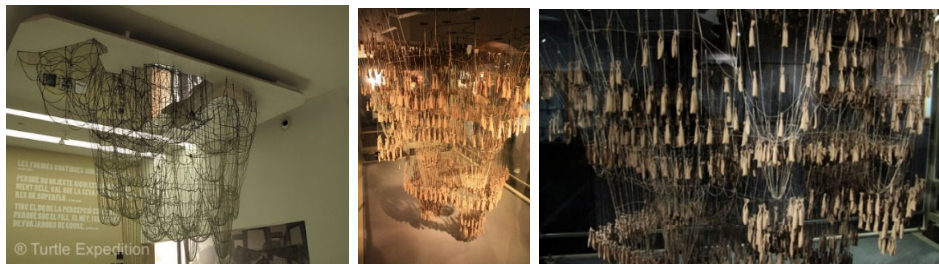


Figura 5.12 – Modelos funiculares, Barcelona, Catalunha, 1898, Antoni Gaudí
(Gaudí House Museum, 2016)

A utilização de modelos e protótipos como processo de exploração do funcionamento estrutural das formas curvas apresenta uma longa tradição, na qual nomes como Felix Candela, e Heinz Isler se inserem, constituindo aqueles, para alguns projetistas, o método privilegiado de conceção. Antoni Gaudí é o exemplo máximo da expressividade e complexidade que este processo pode suportar.

A mudança de escala dos objetos depara-se com algumas dificuldades, pois depende em muito do rigor com que a medição do modelo é feita. Outras limitações que podem ser apontadas são o tempo e a dificuldade de execução dos modelos, com as consequentes dificuldades técnicas e ou económicas.



Figura 5.13 – Ferramentas desenvolvidas por Heinz Isler para aumentar o rigor de medição dos seus protótipos, de modo a garantir rigor na mudança de escala

(“Design e Aplicações de Estruturas em Casca de Formas Livres Ultrafinas”, 2016)

Os processos de prototipagem rápida permitem avaliar o funcionamento estrutural do objeto arquitetónico, Matthias Rippmann e Philippe Block utilizaram este processo para avaliar a sequência de colapso da abóbada projetada para o parque MLK Jr. no Texas. Constatou-se que era possível retirar algumas peças da forma sem que ela colapsasse.

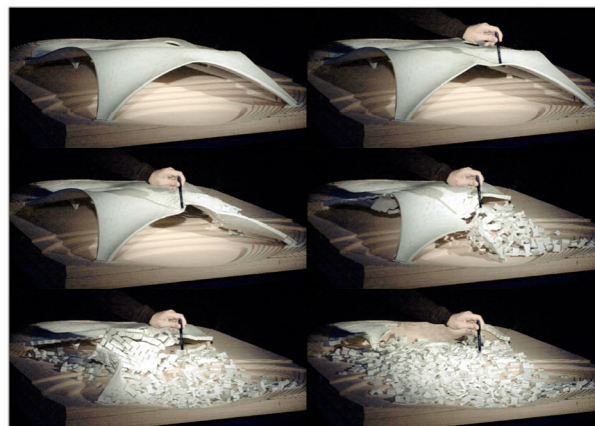


Figura 5.14 – Sequência de colapso da abóbada sem reforço estrutural, forma impressa em 3D, MLK Jr. Park Vault (escala 1:33).18888, Austin, TX, USA, Block Research Group

(Block Research group, n.d.)

A prototipagem rápida diminui o tempo e facilita a execução dos modelos, em especial os de complexidade elevada. A sua definição métrica decorre da representação digital,

pelo que não se colocam dificuldades na avaliação dimensional e métrica, alteração consequente mudança de escala.

Este modelo de conceção permite uma relação bidirecional entre o “modelo físico” e o “modelo digital”; isto pode ser ilustrado pela metodologia de projeto de Frank Gehry, em que a modelação descritiva é cada vez melhor integrada com a lógica dos materiais e dos processos de fabricação.

O CAD introduziu assim novas potencialidades nos processos de conceção. O modelo de CAD tradicional suporta já o fluxo de informações do “modelo físico”, para o “modelo digital”. Deste modo o processo de projeto não tem forçosamente início em ambiente virtual ou bidimensional; com efeito ele inicia-se e recorre a modelos físicos tridimensionais construídos manualmente. Este método é o utilizado como processo metodológico pelo arquiteto Frank Gehry.



Figura 5.15 – Museu MARTa Herford, Bielefeld, Alemanha, 2001, Frank Gehry
(Project Authors”, Archilovers, n.d.)

Os modelos passaram a ser digitalizados, através de tecnologias de digitalização 3D, e a tecnologia CAD permitiu a corrigir a forma digitalizada, em função do programa e da implantação. Assim os dados digitalizados da forma permitiram ser trabalhados para criar modelos mais precisos, explorando a forma com maior detalhe.

Como se pôde constatar, no projeto de Herford na Alemanha, o foco incidiu primordialmente no efeito visual da superfície de oclusão do edifício e da sua relação com os espaços interiores. O fluxo de trabalho foi bidirecional entre o *modelo físico* e o *modelo digital*.



Figura 5.16 – Projeto de Herford modelo físico e o modelo digital
 (“Inserção da Prototipagem e Fabricação Digital no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura”, 2009)

5.5.4 Modelo CAD (geração)

A inclusão dos processos de análise no modelo, vieram completar e conferir uma nova dimensão ao carácter representativo das ferramentas digitais, abrindo novas possibilidades, que permitem interconectar a representação com a respetiva avaliação.

As novas possibilidades decorrentes de processos analíticos acrescentam um carácter preditivo às representações geométricas, extrapolado o *modelo descritivo* anteriormente abordado.

Os processos analíticos de *avaliação* (E), apresentam grande utilidade na estimativa de custos, comportamento estrutural e desempenho ambiental. O modelo digital torna-se preditivo e explícito, afastando-se progressiva e definitivamente dos processos implícitos realizados em papel.

Este modelo confere ao arquiteto uma visão global do projeto e das consequenciais do das suas opções projetais, tal implicando que o arquiteto tenha a capacidade e o conhecimento para gerir todos os aspetos de projeto.

Neste modelo a dimensão tecnológica da arquitetura torna-se particularmente relevante, sendo determinante para o processo conceptual. Esta realidade faz com que o arquiteto tenha que solidificar e em alguns casos ampliar os seus conhecimentos, para ser capaz de operar com este modelo de conceção.

O fluxo de informação entre o módulo de *avaliação* (E) e o módulo de *representação* (R), permite integrar na modelação da peça, processos avançados de construção, através de softwares de avaliação (Eastman, 1999). Este facto confere uma maior

proficiência ao ato conceitual, permitindo que o objeto arquitetônico atinja elevados níveis de excelência, desde logo pela antecipação de erros de projeto.

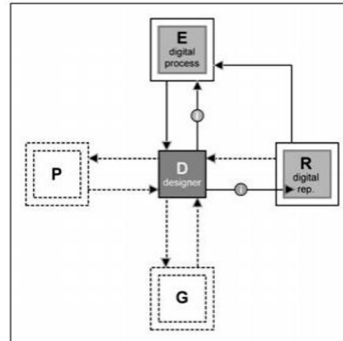


Figura 5.17 – Modelo de avaliação
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 248)

Este fluxo de informação, não só suporta o processo de avaliação avançada, como permite ainda a interação dos diferentes participantes no projeto, e.g., arquitetos e engenheiros.

Para que existam ligações *explicitas* é necessário um banco de dados partilhados, o que acontece com os módulos a *representação* (R) e a *avaliação* (E). Deste modo qualquer alteração na representação digital permite uma avaliação imediata, devido à estrutura que integra a base de dados e a partilha de informações (Oxman, 2005: 248)

5.5.5 Modelos de formação

Os modelos de formação rompem como os modelos CAD, no processo de representação (R), na medida em que deixam de ser meras abstrações estáticas sem possibilidade de extrapolação.

A forma deixa de se manifestar por uma representação *explícita*, ou particularizada, como no *modelo CAD* ou na representação em papel.

As utilizações de ferramentas heterodoxas permitem a manipulação de parâmetros, o projetista consegue produzir um espectro de formas diferentes com base nos mesmo princípios conceituais.

O novo conceito de representação afastou a conceção digital dos processos tradicionais, pois estes deixam de ser capazes de explicitar o pensamento cognitivo e a metodologia de trabalho dos modelos de formação.

O novo modelo conceptual aporta um processo dinâmico, no qual as técnicas digitais avançadas, suportam os processos de representação disponíveis e com as quais é possível interagir durante a conceção. Gera-se assim um novo quadro operativo e um novo processo de pensamento, com profundas implicações no ato ideativo, potencializando os resultados do ato criativo.

A *representação* (R) do projeto deixou de ser a convencional em que o conceito de *forma* é substituído pelo conceito de *formação*. A conceção digital abandona a representação da *forma*, para explorar os processos de *formação*.

Esta decorre de um quadro de atributos definidos pelo projetista, os quais por sua vez determinam a configuração ou formação do objeto. Tal resulta da emergência de novos meios de representação digital, em que se substitui a natureza visual e experimental de esboço em papel, pela modificação interativa digital da *formação*, utilizando-se assim o que pode ser nomeado como modelo de formação.

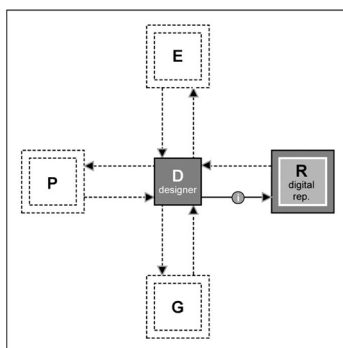


Figura 5.18 – Modelo de formação
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006.Pag.250)

A “geração da forma” arquitetónica neste modelo é baseada no *potencial de interação*, disponibilizado pelas ferramentas digitais. Neste modelo, o projetista, para definir o seu objeto arquitetónico, recorre a técnicas como o scripting, i.e *plug-ins* –vinculados ao tratamento compositivo e visual da forma. Interagindo e operando numa lógica não-

determinística, (ou seja, não partindo de um resultado ou solução escolhida) num processo formativo.

O *modelo de formação* proporciona ao utilizador um elevado nível de interação entre ambiente digital e o controlo da peça, o qual decorre da tecnologia que define o *ambiente digital*, sendo esta a principal característica fenomenológica deste modelo de conceção digital.

O foco destas ferramentas é dado às qualidades formais e geométricas dos objetos, sendo relegada a afabilidade de utilização para um segundo plano. Neste modelo, o projetista detém uma alta aptidão de interação e controlo do ambiente digital, emergindo a necessidade de redefinir o papel do utilizador. O alto grau de especialização, os conhecimentos que abarca e a sua praxis, tornam-no o produtor da ferramenta para a geração da forma – “*toolmaker*”. (Oxman, 2005: 251)

A complexidade de utilização destes sistemas digitais, implica que o utilizador tenha de adquirir conhecimentos de programação razoavelmente complexos, tornando o arquiteto um programador de formas, sendo por isso, normalmente integrado numa equipa, como elemento de suporte ao processo de projeto.

Não obstante as potencialidades deste modelo de conceção, as suas dificuldades operativas restringem a respetiva utilização, tornando-se algumas tarefas mais fáceis de gerir através de outros processos. Os modelos de formação são relegados para tarefas cuja dificuldade e complexidade justifiquem todo o investimento de tempo e conhecimento.

Os meios digitais já provaram no passado que a sua evolução torna o processo de utilização mais afável e simples, é assim de prever que o mesmo venha a acontecer com este modelo de conceção, na medida da sua progressiva utilidade para a especulação formal e espacial.

Contudo, esta poderá acarretar algum perigo de dissonância na exata proporção em que resultados obtidos sem a devida contextualização e avaliação (que não atentem às exigências do programa ou aos desígnios do projeto) podem por sua vez gerar grandes ou graves dificuldades na sua implementação.

Segundo Oxman (2005: 251) este modelo encerra em si um conjunto de subclasses; *Conceção Topológica* – geometria não euclidiana; *Conceção Associativa* – *Modelação Paramétrica*; *Conceção Dinâmica* – modelo formação, baseando-se no movimento

(animação/transformação), no qual se utiliza a animação gráfica evolutiva de formas (morphing) bem como outras técnicas de modelação baseadas no tempo, as quais podem propagar múltiplas instâncias num contínuo dinâmico.

5.5.5.1 Modelos de formação topológicos

A conceção digital baseada na topologia e a geometria não-euclidiana, passa pela criação de regras, que suportem o processo de *formação* do objeto arquitetónico, permitindo alcançar novas formas.

A topologia é o estudo da estrutura formal do objeto e da relação existentes entre os objetos, na qual as qualidades não mudam quando lhe são aplicadas alterações homeomórficas²², por contraponto com a geometria que estuda as propriedades do objeto.

O homeomorfismo constitui-se assim como a noção principal de igualdade em topologia, correspondendo ao isomorfismo de espaços topológicos. Com efeito, dois espaços topológicos dizem-se homeomorfos se existir uma aplicação (i.e., relação matemática entre dois conjuntos caracterizados como domínio e contradomínio ou imagem, exprimindo correspondência entre ambos) a qual seja simultaneamente contínua (i.e., q as pequenas mudanças nos objetos correspondem a pequenas mudanças nas imagens) invertível (i.e., quando o que era domínio na função original possa virar imagem e o que era contradomínio, domínio) e em que a sua inversa seja também contínua. Um isomorfismo ou homeomorfismo é deste modo um morfismo que obriga à existência de um morfismo inverso

A estrutura topológica pode assim, ser explicada numa diversidade de formas geométricas complexas. Michele Emmer (2004), na sua obra “*Mathland: from flatland to hypersurfaces*” – “investigou o papel da topologia como novo processo conceptual de *formação*”.

A conceção topológica, é propulsora das primeiras demonstrações formais de uma nova visão filosófica, que define universo(s de) a conceção digital. A lógica emergente acomoda a complexidade das condições não-lineares e de rede, afastando-se da lógica

²²Heteromórficas – há uma diferenciação e uma divisão de trabalho entre homeomorfismo é a noção principal de igualdade em topologia, sendo o isomorfismo de espaços topológicos.

“mais estática e tipologicamente determinista”, das metodologias de projeto de geração anteriormente abordadas. (Oxman, 2005: 251)

Nestes meios digitais as coordenadas estáticas das formas convencionais e digitais são substituídas por construções dinâmicas e computacionais, no qual se incluem superfícies topológicas, ou híper-superfícies²³.

Os modificadores digitais garantem a manipulação correspondente de formas geométricas complexas, de um modo altamente interativo (é o que podemos chamar de *conceção topológica*) recorrendo às entidades Nurbs, non-uniformrational b-splines, ou às operações de modelação, como o “*lofting*” os quais permitem o traçar formas complexas, por exemplo o desenho de curva sucessivas contínuas e contracurva, através da intersecção de raios interpolados. Estes recursos digitais suportaram as híper superfícies, arquitetura blob, híper-corpo, fundamentadas no campo teórico por Van Berkel e Caroline Bos, Lynn; Oosterhuis.

As terminologias descritas, apresentam um quadro teórico com ligações às morfologias complexas das quais são exemplos a *híper continuidade e híper-conectividade neste modelo o arquiteto é responsável pelo ambiente de trabalho. Do mesmo modo encontramos modelos que se suportam nas condições biológicas* (conectividade em rede e complexidade rizomática). Na década de 90 do séc. XX, estes conceitos foram determinantes, para o avanço da teoria e prática da conceção digital.

Porém, neste modelo conceptual não são raras as vezes em que frescura e novidade formal contrastam com a solidez tecnológica do projeto, já que as enormes potencialidades formais disponibilizadas por estes meios digitais, contrastam nalguns casos vivamente com as soluções tectónicas e estruturais efetivamente adotadas, podendo ser consideradas na visão de alguns projetistas, leia-se arquitetos, em muitos casos como sendo mesmo efetivamente desajustadas.

²³ Na geometria, uma hipersuperfície é uma generalização dos conceitos de hiperplano, curva plana e superfície. Uma hipersuperfície é uma variedade múltipla ou algébrica de dimensão $n-1$, que está embutida em um espaço de dimensão ambiental n , geralmente um espaço euclidiano, um espaço afim ou um espaço projetivo. As hipersurfaces compartilham, com superfícies em um espaço tridimensional, a propriedade de serem definidas por uma única equação implícita, pelo menos localmente e, às vezes, globalmente.

A hipersuperfície em um espaço (euclideano, afim ou projetivo) da dimensão dois é uma curva plana. Em um espaço de dimensão três, é uma superfície.

5.5.5.2 Modelos de formação de design associativo

A conceção associativa é baseada em técnicas de conceção paramétrica que pesquisam a geometria associativa.

A geometria associativa explícita difere dos princípios topológicos, pelos meios digitais que permitem a redesenhar os parâmetros do processo geométrico. (Burry & Murray, 1997; Burry, 1999)

Nas relações conceptuais paramétrica, as conexões entre objetos são descritivas e explícitas, criando interdependências entre os vários objetos, pelo que as transformações recorrem sistematicamente a esses atributos e, assim, a definição de diferentes valores pode gerar múltiplas variações, mantendo-se porém as mesmas condições topológicas.

Na conceção paramétrica pode ser gerada e manipulada geometria complexa e geometrias não padrão, no qual se incluem o *Bentley Systems' Generative Components technology*, ou ainda *CATIA* (modelador paramétrico de alto desempenho, para a área da conceção automobilística e aeroespacial) utilizado pelo arquiteto Frank Gehry. (Oxman, 2009)

O exemplo do modelo associativo pode ser dado pelo museu da Mercedes-Benz, projetado por Frank Gehry (2005), Estugarda – Alemanha, onde foram sucessivamente criadas diferentes figuras geométricas, alterando-se para tal os parâmetros.

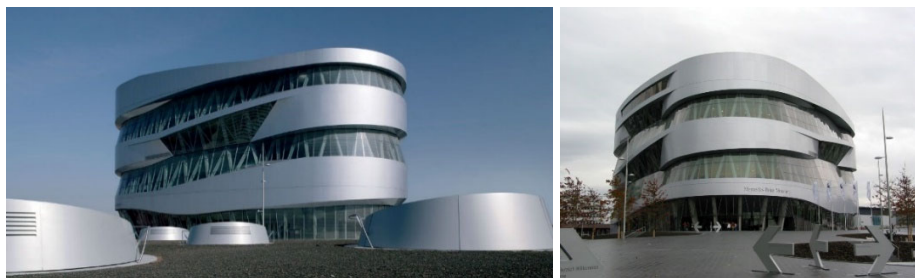


Figura 5.19 – Museu da Mercedes-Benz, Estugarda, Alemanha, 2017, UNStudio
(Mercedes-Benz Museum, n.d.)

A composição que deriva de uma forma com três folhas – trifóide, foi gerada com base numa composição bidimensional de círculos, tangentes e pontos de intercessão. Partindo da geometria básica, as curvas foram transformadas em volumes tridimensionais de betão, definindo-se deste modo os espaços, os seus ambientes, o sistema estrutural, o pé-direito, a largura das rampas e a dimensão dos espaços. Os parâmetros, continha todos os dados para a fabricação, planeando a construção do edifício.

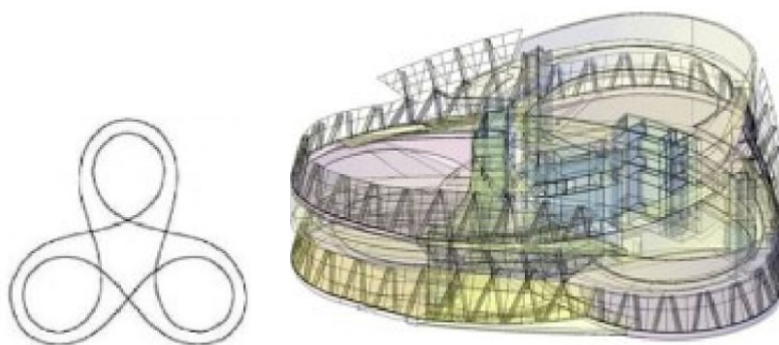


Figura 5.20 – Forma trifóide, Modelo paramétrico do museu Museu da Mercedes-Benz.
 (“Mercedes Museum, Stuttgart”, 2008: 170)

5.5.6 Modelo de conceção generativa

Este modelo é suportado por mecanismos computacionais generativos complexos, as formas manifestam-se pela aplicação de fórmulas gerativas pré-definidas que o projetista pode operar e interagir na busca formal, antevendo-a inicialmente ainda que intuitivamente ou até não. O processo conceptual da forma provem de regras, relações e princípios generativos.

No modelo CAD o utilizador trabalha com a organização geométrica dos objetos, contudo, nesse processo de conceção, o objeto já é conhecido pelo projetista quando da sua representação; por contraponto, os modelos de formação digitais, fornecem meios de controlo geométrico e topológico que permitem gerar variantes formais. E se bem que os aspetos geométricos que suportam a conceção do objeto estejam já definidos, no entanto, a sua definição formal não está predefinida à partida.

Os Modelos generativos de conceção digital são caracterizados pela disponibilização dos mecanismos computacionais, capazes de gerar os processos de formalização, conforme melhor se pode perceber na Fig. 5.21 infra.

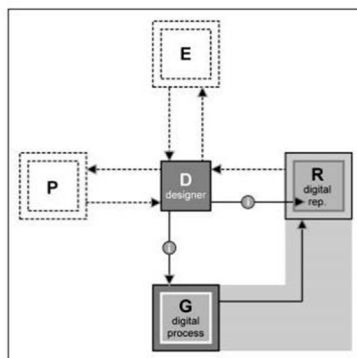


Figura 5.21 – Modelo generativo
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 255)

Nos modelos de *formação*, o projetista manipula o mecanismo gerador do processo de conceção; o modelo generativo é assim o resultado de mecanismos complexos com os quais o projetista interage para obter a forma arquitetónica funcionalmente prevista ou não, estas são o resultado de processos generativos pré-formulados, sendo a interação uma grande prioridade neste modelo de conceção.

O corpo teórico dos modelos generativos é formado por duas correntes principais: o Modelo de Transformação Gramatical – gramáticas de formas (a definir pelo Projetista) (stiny, 1980; Knight e Stiny, 2001); e os Modelos Evolutivos – técnicas evolutivas, baseadas ou inspiradas em princípios de geração natural e adaptação biológica (D’arcy Thompson, “On growth and form” 1917).

5.5.6.1 Modelo de conceção de transformação gramaticais

Este processo pré-generativo é o resultado de formas e conteúdos, permitindo que o projetista vistorie a escolha das opções mais desejadas ou que considere mais apropriada(s).

As gramáticas de forma ou algoritmos são expressões matemáticas, que dirigem o processo de geração da forma, através de regras de transformação. Convém precisar,

porém, que estas dizem mais respeito ao carácter topológico, gradiente da forma que da sua composição individual. Shea (2004) no seu trabalho, mostrou o potencial desta abordagem no capítulo da conceção digital. As gramáticas adaptaram um carácter mais abstrato, menos compositivo e mais topológico.

Exemplo de como os algoritmos geométricos podem organizar o espaço é o Serpentine Gallery Pavilion, projetado por Toyo Ito (2002), Londres – Inglaterra. O arquiteto começa por cruzar uma forma prismática – paralelepípedo definido por um conjunto de linhas ao acaso que o conformam. Uma regra recursiva simples, racionaliza a geometria, a estrutura e consequentemente a sua produção. As arestas foram divididas por dois e por três, de seguida, o ponto médio da aresta é unido com o 1/3 da aresta adjacente. O algoritmo usado sete vezes, conformando assim uma espiral, com uma redução de uma média de 17% do tamanho, a cada rotação. A sétima repetição estendeu todas as linhas, gerando um padrão infinito que é rebatido da cobertura para as paredes da caixa.

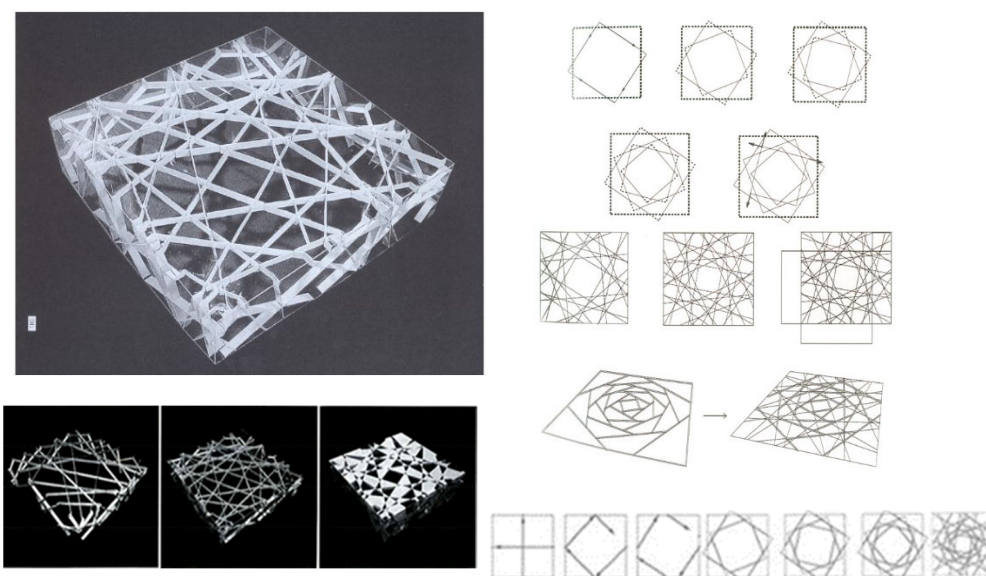


Figura 5.22 – Esquema e modelo conceptual do pavilhão Serpentine Gallery, 2002, Londres, Inglaterra, Toyo Ito
 (“O espaço arquitectónico em exposição”, 2013)

5.5.6.2 Modelos de conceção evolutiva

Este modelo utiliza técnicas evolutivas para a geração da forma, baseadas em modelos de geração natural - algoritmos genéticos²⁴, que podem ser aplicados no processo generativo do projeto arquitetónico.

A forma é assim o resultado de um processo generativo evolucionário. Os processos generativos são baseados em algoritmos que possuem parâmetros de modelagem; partem de uma lógica inicial; seguem para um método de criação e variações; e por fim, passam por um último método para selecionar os resultados obtidos.

Os modelos biológicos de evolução começam a desempenhar um papel na conceção digital, especialmente aqueles que estão relacionados com os conceitos de morfogénese (Hensel et al., 2004) conforme explicado no Cap. I, supra. A conceção generativa, baseia-se em metáforas biológicas, normalmente associadas ao trabalho desenvolvido por D'arcy thompson, "On growth and Form" e Gould, "The Structure of Evolutionary Theory" (Gould, 2002).

Este processo assume-se como uma visão teórica orgânica, não mecanicista da geração, os sistemas evolutivos baseados na morfogénese produzem propriedades relacionadas com a diferenciação e a heterogeneidade, estas características são consideradas, como as duas propriedades mais importantes de modelos digitais atuais.

5.5.7 Modelo de desempenho

A conceção baseada no desempenho pode ser considerada como um processo de *formação* da peça arquitetónica, direcionado para um nível de performance desejado. Estes modelos suportam-se nas tecnologias digitais para gerar a forma a partir de determinantes externas, i.e. ambientais, características do lugar, exigências do programa.

²⁴ John Holland define algoritmos genéticos como representações dos processos de variação computacionais, recombinação e seleção com base na aptidão, princípio subjacente à maior parte dos processos de evolução e de adaptação (Holland, 1992).

Segundo Kolarevic (2005), métodos digitais para a avaliação do desempenho do edifício têm com o objetivo aperfeiçoar o objeto arquitetónico, prevenindo problemas no seu funcionamento, tornando assim possível, controlar os níveis de desempenho técnico.

O modelo construído digitalmente do edifício é submetido a softwares de cálculo, sendo desta forma possível antever e assim colmatar os problemas, ineficiência, ou eventuais baixos desempenhos, como os decorrentes dos ganhos e perdas energéticas, sobreaquecimento, consequentes custos energéticos, insonorização ou desempenho acústico, problemas estruturais, entre outros.

Segundo Kolarevic (2005), são numerosas as definições para uma arquitetura baseada na performance, i.e., no desempenho, podendo isto significar desde um *progresso técnico*, a nível do projeto digital e do seu respetivo *processo de fabricação*, um desempenho estrutural, térmico ou acústico; por exemplo. Em rigor e levado ao limite, pode ainda contemplar ou alcançar *numerosos campos*, “como o financeiro, o espacial, o ecológico, o social e o cultural”.

Kolarevic (2003) advoga o desenvolvimento de softwares capazes de gerar processos dinâmicos de *formação*, a partir da definição de desempenhos específicos. Neste âmbito, o desempenho assume-se com uma técnica de *formação*, ou um processo gerador, cujas variantes são definidas parametricamente pelas condições do *problema* – (local, programa e técnica). Este modelo composto de conceção específica é muitas vezes classificado como um modelo simples de avaliação.

Na conceção baseada no desempenho, o objeto é gerado em função da simulação do seu desempenho ou comportamento. Nesta categoria temos apresentado duas subclasses: a *formação baseada no desempenho*; e a *performance/desempenho baseada na geração*.

A categorização do desempenho na arquitetura abarca as seguintes definições, concretamente as de:

Arquitetura performativa, a qual trata de edifícios que desempenham um papel no cenário urbano;

Avaliação de desempenho, que abarca processos de avaliação de desempenho do edifício após a sua construção ou após a conclusão do projeto arquitetónico;

Projeto performativo, o qual utiliza os desempenhos pretendidos como restrições ao projeto arquitetônico, ou mesmo como condicionador da forma.

5.5.7.1 Modelos de formação baseados no desempenho

A conceção baseada na formação pode ser considerada como um processo de desempenho, quando a simulação resulta de condicionantes externas, aplicadas na ao processo de formação Fig. 5.23 infra.

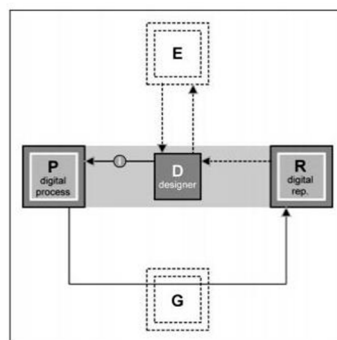


Figura 5.23 – Modelo de formação baseado no desempenho
(“Theory and design in the first digital age”, 2006.Pag.258)

O desempenho pode ser incluído entre os vários parâmetros da conceção, designadamente desempenho ambiental, custos financeiros, perspectivas espaciais, sociais, culturais, ecológicas e, necessariamente, tecnológicas.

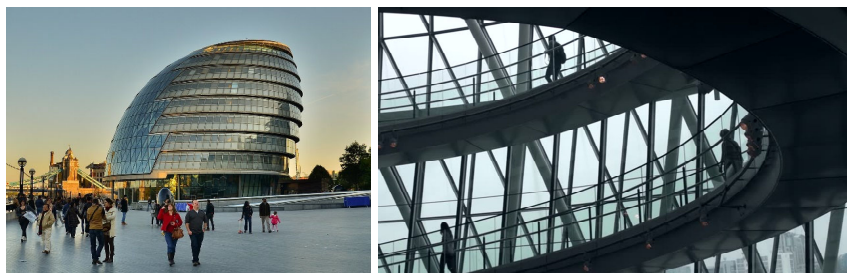


Figura 5.24 – Greater London Authority Headquarters, Londres, Inglaterra, 2002, Foster & Partners
(“Greater London Authority interior, London”, 2002)

O projeto realizado para o edifício Greater London Authority Headquarters (2002) da autoria do gabinete Foster & Partners, mostra essa abordagem ao aplicar técnicas baseadas no desempenho, como programas de simulação, análise e otimização, no âmbito do desempenho energético e acústico, em que as soluções foram sendo alcançadas enquanto a superfície curvilínea da própria fachada era projetada.

Outro exemplo é o do edifício Swiss RE (2004), também desenhado pelo atelier Foster & Partners onde foram empregues técnicas de desempenho ambiental, para otimizar a iluminação e ventilação natural, com o objetivo de diminuir o uso de energia do edifício. A geometria da forma foi gerada, com o objetivo de responder a estes critérios específicos, tendo sido usada uma simulação paramétrica específica de desempenho. Este processo de conceção resultou numa torre de 40 andares, totalizando 180 metros, na qual se pôde constatar uma rutura radical com as convecções dos tradicionais arranha-céus, designadamente na organização interna, orientação e dimensão das fenestranças.

No processo de conceção, a influência das condicionantes externas pode ser tida em conta, para informar o comportamento complexo de um modelo, permitindo a sua manipulação e transformação. Este aspeto metodológico pode ser relevante para objetos dinâmicos onde as respetivas simulações dinâmicas podem ser calculadas considerando as influências ambientais.



Figura 5.25 – Edifício Swiss RE, Londres, Inglaterra, (2004), Foster & Partners
(“Greater London Authority interior, London”, 2002)

5.5.7.2 Modelo de geração baseados no desempenho

A conceção generativa baseada no desempenho, toma como princípios operativos os processos generativos, os quais como não pode deixar de ser têm como foco o *desempenho*. A informação do contexto é fundamental para a conceção da forma arquitetónica, em que os respetivos dados são considerados como “*forças externas*” (Oxaman, 2005: 258) abrangendo-se assim e designadamente várias componentes, como *aspetos ambientais, estruturais; acústicos; transportes; terreno; programa*.

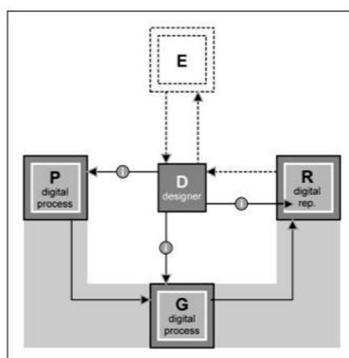


Figura 5.26 Modelo generativo baseado no desempenho
 (“Theory and design in the first digital age”, 2006: 259)

A informação carreada permite ativar e manipular os processos de conceção digital. No modelo de geração com base no *desempenho* (cfr. Fig. 5.26, supra), os dados relativos ao *desempenho* condicionam os processos de *formação* e *geração* (G) na busca da forma; o utilizador pode assim interagir com os módulos dos diferentes *preceitos de projeto*, definindo os critérios de performance, ou desempenho, para o processo de *geração*, deste modo interagindo diretamente com a *representação* (R) digital da forma.

A conceção digital associada às animações baseadas no desempenho, podem ser encontradas no Terminal Rodoviário de Nova York de Lynn (Lynn, 1999). O projeto demonstra o uso de um *sistema de partículas* é usado para observar as áreas de gradiente de atração e de fluxo de padrões presente *in situ*. Este foram criados, simulando *campos de força associados* ao movimento e ao fluxo de pedestres, carro e autocarro em todo o entorno.

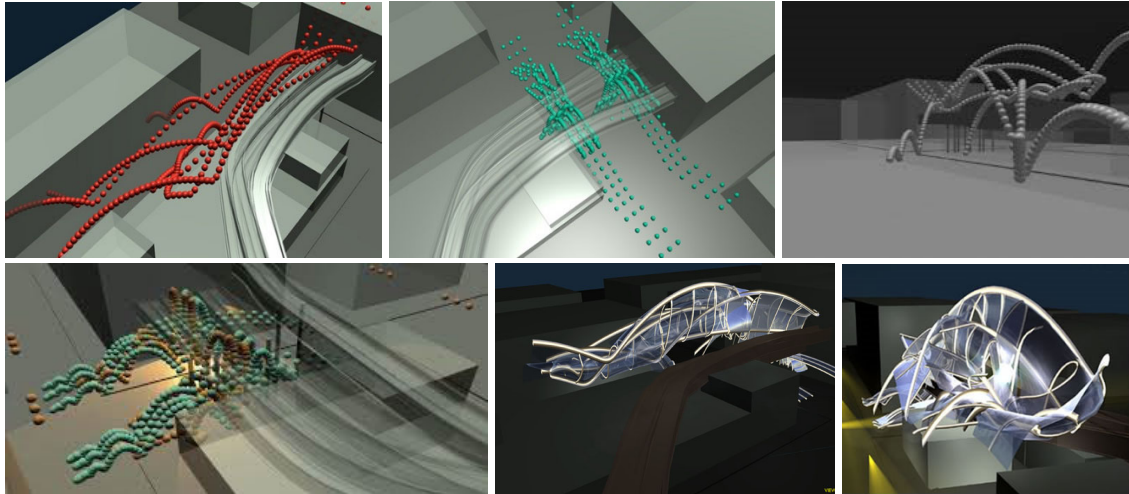


Figura 5.27 – Esquemas generativos do Terminal Rodoviário de Nova York, Estados Unidos da América, 1999, Greg Lynn
(Terminal Rodoviário de Nova York” Desigboom, 1999)

5.5.8 Modelos compostos

Os *Modelos compostos* serão o paradigma do futuro dos meios digitais, são a base das futuras ferramentas informáticas e, eventualmente de Inteligência artificial, logo com fortes implicações naquilo que serão as próximas virtualidades de projeto. Estes modelos baseiam-se em processos integrados, que incluem *representação* (R), *geração* (G), *avaliação* (E), *performance* (P); num plano ideal o desenvolvimento permitirá uma interação de todos os módulos, em que o fluxo de informação circulará em múltiplas direções.

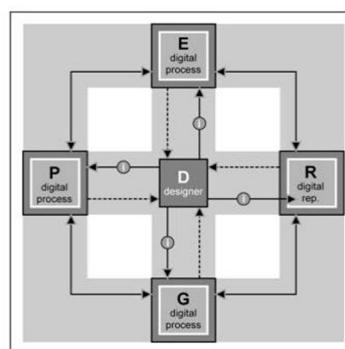


Figura 5.28 – Modelo compost
(Theory and design in the first digital age, 2006:261)

Estes meios digitais de conceção integrada são capazes de abarcar todos os *preceitos ou atividades de projeto*, o objetivo é no futuro gerar sistemas digitais integrados compostos (Fig. 5.28 infra) em que todos os preceitos de projeto interagem de forma atomística simultaneamente com todos.

5.6 Modelo José Duarte et al.

O modelo concebido por José Duarte, Gabriela Celani e Regiane Pupo, aborda a introdução dos métodos computacionais de desenho e das novas tecnologias, nos cursos de arquitetura, em Portugal e no Brasil.

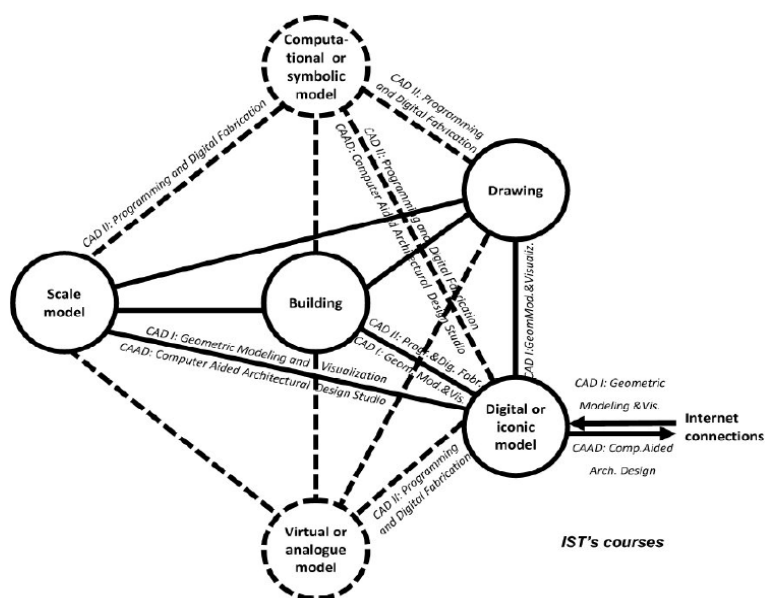


Figura 5.29 – José Duarte et al, processos disciplinares e cursos IST
 (“Processos disciplinares e interação destes com os cursos ministrados no programa de pré-graduação do Instituto Superior Técnico”, 2011)

O foco dos autores foi definir em função dos meios digitais disponíveis a sua contextualização pedagógica no processo de aprendizagem. A sua reflexão permitiu formular um modelo teórico para a organização das tecnologias digitais, na estrutura curricular dos cursos de arquitetura, no contexto das instituições académicas de onde são provenientes.

Os autores partiram da análise dos modelos de aplicação, dos meios digitais já existentes, tendo com referência os trabalhos desenvolvidos por William Mitchell e Rivka Oxman. O modelo proposto por estes autores reinterpreta o modelo proposto por

Mitchell, propondo três tipos de representação: *o modelo virtual ou analógico; o modelo digital ou icónico e o modelo computacional ou simbólico.*

O *modelo digital ou icónico* inclui a informação sobre geometria e texturas, sendo que esta informação visual podia ser enviada para o *modelo virtual ou analógico*, e este modelo em sequência, podia reenviar a informação para o *modelo digital*. Com recurso à programação de CAD – (AutoLISP), seria possível que o *modelo digital* enviasse informação ao *modelo computacional*, podendo esta informação ser por sua vez reenviada, num ou noutro vetores.

O esquema proposto resulta da relação entre as disciplinas curriculares e os meios digitais. A taxonomia descreve neste caso a relação entre os vários modelos adotados pelos autores referidos e a sua implementação com base nas disciplinas que funcionam como veículos dessa interação.

5.7 Modelo Mitchell & McCullough

No modelo concebido por Mitchell & McCullough, o processo de conceção da peça arquitetónica é o resultado de um processo que integra os diferentes tipos de representação analógica e digital. Do processo fazem parte o desenho em papel, a maquete à escala e o modelo digital. Durante o ciclo de conceção estes meios interagem

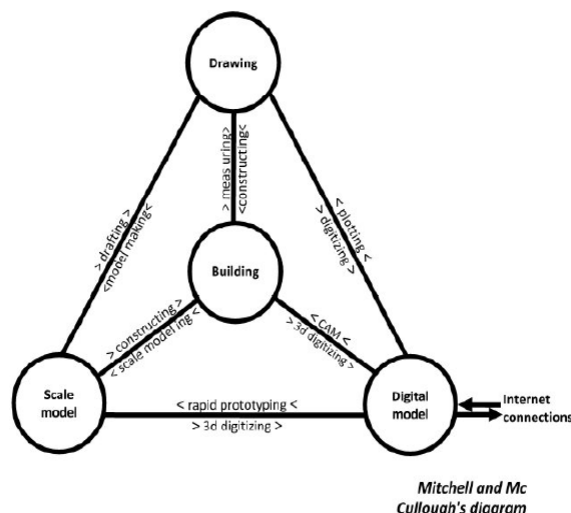


Figura 5.30 – Diagrama adaptado de Mitchell e McCullough (1994)
 ("Cadernos de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo", 2008)

entre si para consubstanciar o projeto de arquitetura. Assim um desenho em papel, permite a realização de uma maquete – modelo físico à escala, este modelo pode ser posteriormente digitalizado, ou servir auxiliar à construção da peça arquitetónica.

Estes meios podem configurar vários processos cuja articulação está descrita no esquema taxonómico.

5.8 Modelo Kieram – da produção em série à personalização em massa

A indústria da construção devido aos recursos que consome e ao número de intervenientes que mobiliza, de modo diretos e indireto, é uma das indústrias mais impactantes a vários níveis, económico, ambiental, laboral e, mesmo de projeto. É também uma das indústrias mais tradicionais (e mesmo às vezes tradicionalista, algo que tem vindo a evoluir nos últimos tempos) nos sistemas de produção que utiliza e, comparativamente com outras, apresenta um menor índice de integração de tecnologias digitais nos seus processos²⁵ de produção, o que tem implicações negativas na eficiência e nos índices de produtividade.

Os processos tectónicos são na sua maioria baseados em técnicas manuais, lentas e que privilegiam a construção *in situ*, a sua ineficácia e desajuste acarreta um maior desperdício e consumo de recursos. A ineficiência do ciclo produtivo implica por isso produtos mais caros, os quais porventura serão por isso menos adaptados ao consumidor normatizado.

Kieram e Timberlake (204: 80), efetuaram um estudo comparativo entre as diversas indústrias, tendo observado que o processo de montagem da indústria automóvel, até ao séc. XIX, era efetuada no exterior, e só no séc. XX a produção passou a beneficiar de um ambiente protegido, o que produziu uma alteração da sequência e eficiência de montagem.

A linha de montagem chegou em 1914 com Henry Ford (1863-1947) em que as peças eram montadas segundo uma sequência determinada, que visava a otimização do

²⁵ Referente ao atraso tecnológico na construção, veja-se: Woudhuysen, J. and I. Abley (2004) *Why is construction so backward?* Chichester: Wiley-Academy.

processo de construção, o que permitiu a especialização das tarefas e um significativo aumento consequente da produtividade.

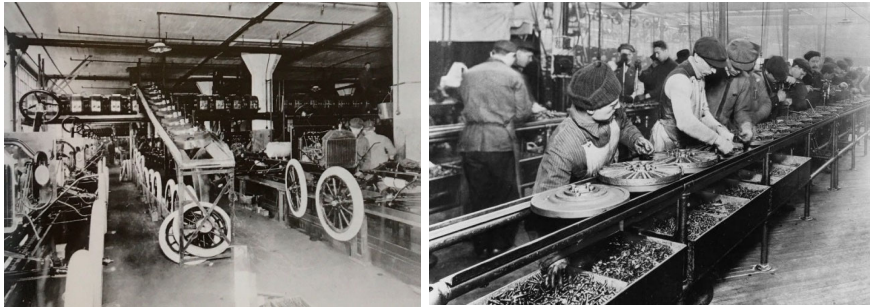


Figura 5.31 – Linha de montagem Ford modelo T
 (“Os 100 anos do caminhão modelo T”, 2010)

Estes princípios estão, ainda que de modo genérico, na base da produção digital em módulos, que foi introduzida no séc. XXI. A engenharia de processos fragmentou o ciclo de produção em partes, mantendo uma visão de conjunto. Esta partição em módulos, permitiu não só uma especialização das tarefas de produção como também delimitou áreas de investigação. A abordagem modelar possibilita que os diferentes módulos sejam desenvolvidos e pré-montados em locais diferentes, mantendo uma entidade que assegura a sua montagem.

Esta reorganização do sistema produtivo, desenvolveu os processos de produção, no capítulo dos materiais empregues e dos sistemas de ligações entre as partes, reduzindo assim os desperdícios. A segmentação e especialização criteriosa, fizeram deste modo diminuir o período de produção, a qualidade, e os valores de produção.

A indústria de construção apresenta hoje processos similares aos da indústria automóvel no início do século XX, em que a construção era feita peça a peça e *in situ*,

A análise produzida por Kieram e Timberlake (2004) revela-nos um conjunto de razões que apontam ainda para alguma ineficiência e atraso no sector, como o recurso quase exclusivo à construção *in situ*, pouca pré-fabricação, bem como o recurso à subcontratação de um modo intensivo, não tendo sido capaz de incorporar todo o potencial das tecnologias digitais, no seu processo construtivo, ao contrário das indústrias, automóvel, náutica e aeronáutica, que foram pioneiras neste salto

tecnológico, com implicações na sua produtividade e no universo formal. Estas há muito que recorrem às superfícies curvas e de dupla curvatura, com modo de otimizar o desempenho dos seus produtos, sem que o processo construtivo seja um óbice, na sua utilização, resultando pelo contrário em elevadas majorações a diversos níveis, como concetual, melhoria de resistência de materiais, redução de custos, entre outros.

A evolução dos processos de computação, possibilitou o desenvolvimento tecnológico no campo da representação e da manufatura da arquitetura e, assim foi possível combinar o *desenho assistido por computador* – (CAD) com a *manufatura assistida por computador* – (CAM). Nesta sinergia, como é do conhecimento geral, o processo CAD/CAM, gera a informação digital que permite operar as máquinas CNC de modo a executar peças de um modo automático.

A conjugação dos processos de produção em série, com os novos processos de fabricação, proporciona a criação de novos ciclos produtivos. Este novo paradigma possibilita uma produção em massa personalizada, mais conhecida na respetiva expressão anglo-saxónica como *mass-customization*²⁶.

Kieram e Timberlake estudaram as possibilidades de integração dos princípios da *mass-customization* no ciclo produtivo da arquitetura, tendo concluído que as novas ferramentas digitais possibilitam uma maior personalização, sem aumento de custo, de um modo mais adequado para o consumidor.

Para Kieram e Timberlake as ferramentas digitais têm um papel integrador, permitindo articular, os diferentes intervenientes e processos. Estas suportam a criação, manipulação e transmissão da informação de um modo rápido e eficaz. A abordagem ao projeto deixa de ser entendida como um conjunto de tarefas sequenciadas e passa a ser um processo simultâneo e interativo, que permite a representação 3D, bem como a análise e a prototipagem rápidas.

O carácter simultâneo do processo solidifica o ciclo ideativo e encurta o ciclo produtivo, para o que se, requer transversalidade, designadamente, através da integração da

²⁶ O conceito *mass-customization* foi introduzido por Stanley Davis. Cf. Davis, S. (1987) *Future Perfect*. Massachusetts: Addison Wesley.

informação produzida pelos projetistas, construtores, fabricantes e investigadores de materiais e sistemas construtivas.

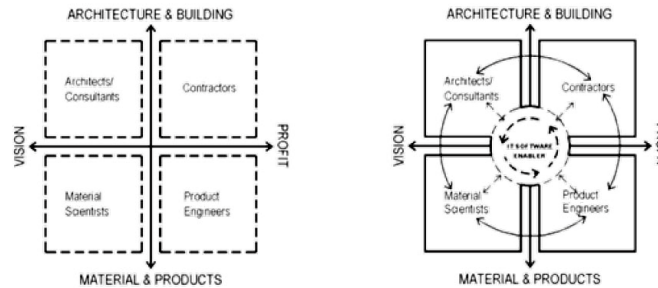


Figura 5.32 – A estratificação e a segregação em arquitetura– Promovendo a inteligência coletiva 53

(“A estratificação e a segregação em arquitetura– Promovendo a inteligência coletiva”, 2004)

O Diagrama da *arquitetura de re-fabricação* (Kieran and Timberlake, 2004), contrapõe o relacionamento dos vários agentes com uma proposta de relacionamento integrado e centralizado entre as várias entidades envolvidas no processo de design arquitetónico.

O sistema proposto *promove a inteligência coletiva*, implementando uma prática integrada dos diversos agentes da arquitetura. Este processo funda-se na utilização dos meios e ferramentas digitais e, estes resultam na base que promove a interconetividade destes agentes.

5.9 conclusão

Em síntese os modelos analisados apresentam diferentes abordagens às ferramentas digitais e à sua contextualização na arquitetura.

No modelo apresentado por Oxman, o utilizador ocupa o lugar central, ao passo que nos modelos propostos por Mitchell e Duarte et al. o centro é ocupado pela peça arquitetónica. Já no modelo de Kieran & Timberlake, as ferramentas digitais estão no centro, catalisando os processos das várias áreas que participam da arquitetura, como a engenharia e construção e materiais.

Quase todos os modelos incluem uma referência aos modelos analógicos e à sua transição para o digital, dando especial relevo à questão da representação, que se encontra individualizada nos modelos de Mitchell, de Oxman e de Duarte et al, no que em última análise terá a ver com o momento cultural em que querendo ou não ainda se inserem e em que antevendo procuram antecipar e fundamentar eventual mudança de paradigma.

Os modelos pré-digitais atribuem uma maior relevância à representação que à informação, contudo parece-nos que não existe a necessidade efetuar esta separação. No nosso entender, a informação passa a desempenhar o papel fundamental nos modelos digitais, estando dispersa nos seus diferentes processos, interações e métodos digitais. A representação pode estar presente no Input²⁷, ao longo do processo, no resultado ou output. E, assim, em nosso entender também é a gestão da (in)formação e dos diferentes processos em interatividade que acaba necessariamente por adquirir maior relevância que a representação, não por qualquer menorização, mas porque esta passa a ser um dado presente em todas as fases.

A representação perde a centralidade na taxonomia dos processos digitais, sendo substituída pela informação, que o veículo que vai suportar o modelo, o qual por a informação ser necessariamente transversal transforma pela própria natureza imanente o projeto conceção/construção numa realidade holística.

²⁷ *Input* designa conjunto de dados introduzidos; *output*, resultado do processo interno realizado por um computador, saída

Capítulo 6 - Produção em arquitetura

6 Preâmbulo

Como elemento prévio para enquadramento da matéria aqui abordada, será conveniente referir que, o conhecimento dos diferentes processos de produção se revela determinante para o desenvolvimento e execução deste protótipo ou, aliás, de qualquer outro. É esta a contextualização certa para perceber que um dos caminhos para ultrapassar as dificuldades de construção colocadas pelas superfícies curvas e de dupla curvatura se encontrará na tecnologia e nos processos que a viabiliza e, consequentemente ao processo de produção.

Um desenho correto do ciclo de produção permite, por um lado, minimizar as desvantagens construtivas intrínsecas a este tipo de formas e, por outro, inclusive, a eventual miscigenação dos processos de produção o que permitiria potenciar alcançarem-se soluções otimizadas para estas geometrias.

6.1 Introdução

Ao longo da história da Arquitetura é possível estabelecer uma relação entre a evolução espacial e tipológica e a evolução dos meios de produção, sendo que ambas trouxeram novas perspectivas ao exercício desta Arte Real - a Arquitetura. Uma análise às evoluções dos processos de produção permite descortinar, não só os seus impactos na gestão construtiva e espacial, como também compreender os desígnios conceptuais que afetam os diferentes tempos que constituem a história desta disciplina.

Douglas Greenwald considera que os processos de produção resultam da conjugação do contexto, designadamente estético, histórico, conjuntural, político, geográfico, científico, tecnológico e económico, trabalho, materiais e equipamentos necessários para obter um determinado quantidade, alertando para além disso, para o facto de que *“cada meio de produção assume um determinado patamar tecnológico” sendo que “a partir do momento que começam a ser introduzidas inovações tecnológicas, o meio de produção altera”*. (Greenwald 1973: 454)

Socorrendo-nos de uma análise de enfoque historicista, a mesma poderá permitir revelar-nos três ciclos a nível da periodologia, em que a relação entre a arquitetura e os lógicas de produção foram efetivamente alterados pelas inovações tecnológicas, concretamente e a saber:

1. A Manual;
2. A Mecânica;
3. A Digital.

6.2 Condição de produção manual

A sociedade pré-industrial é caracterizada por um processo produtivo baseado no trabalho manual; Kieran e Timberlake (2004:5), caracterizam-na assim pela condição respeitante ao carácter manual do processo; deste modo *“fazer à mão era a única maneira que tinham de fabricar artefactos” até ao fim do período em questão e no qual podemos enquadrar a duração da “maior parte da nossa história”*.

O conhecimento, que suportava esta condição produtiva era de base empírica e portanto menos científica, embora muitas vezes não menos correta, sendo transmitido de geração em geração.

Esta aprendizagem era por isso caracterizada pela falta de sistematização do conhecimento teórico-especulativo e mais intrínseco ao conceito do saber (como) fazer. O exercício profissional apresentava um carácter corporativo, no qual as corporações dos ofícios – guildas, regulavam o acesso à profissão e tinham uma grande importância na organização laboral e na passagem do conhecimento, feito normalmente de forma iniciática. Os processos de produção eram suportados pelo trabalho dos artesões, detentores de um profundo conhecimento tácito²⁸ das técnicas da sua arte, dos

²⁸ Segundo Peter Dormer (1994: 10) o conhecimento tácito refere-se ao saber decorrente da experiência – dos nossos sentidos, bem como de realizar vários tipos de trabalhos. Conhecimento tácito é diferente do conhecimento proposicional, revela-se difícil de ser descrito por palavras, ou matematicamente.

materiais, e das ferramentas, lógica essa que, pontuando o período medieval, se estendeu até à revolução industrial.

6.2.1 A arquitetura e a condição manual

O universo edificatório da Idade Média pelo menos na sua máxima pujança, resultava na construção de fortalezas e catedrais, conferindo deste modo expressão aos poderes político e eclesiástico, na medida em que a arquitetura é assim vista como um veículo representativo dos seus desígnios e vocações intrínsecas.

A mão de obra qualificada era primordial para a edificação destas obras e, segundo Cipolla (1974:107) existia à época uma consciência “*da importância de dispor de trabalho especializado para o progresso económico*”. É neste contexto que emergem os artesões qualificados e as respetivas guildas profissionais, determinantes na valorização do saber fazer, o que modernamente traduziríamos pelo anglicismo do *know how*. O mestre-pedreiro era neste contexto, mais até do que um operário especializado, um especialista, reconhecido nessa qualidade pelos dignatários políticos e clericais.

Os mestres-pedreiros regiam-se, como se referiu, por um espírito corporativista, traduzido em guildas, ou com outros contornos não menos densificados, em corporações, passe o aparente pleonismo, no qual o acesso à profissão e ao conhecimento eram controlados.

Com efeito, e em Portugal, mercê da crise dinástica e da necessidade do ‘Challenger’ régio político, concretamente o Mestre de Aviz, em assegurar apoios e legitimação, foi necessário assegurar o apoio das hostes representativas e mais organizadas do povo (e, também por isso, mais operativas e eficazes) até por a Nobreza se mostrar dividida.

Com a vitória daquele que viria depois a ser D. João I, de Aviz, chegou-se deste modo muito cedo em Portugal, na Lisboa do Séc. XIV, ao exercício *em pleno* de poderes político-executivos e legislativos, a nível municipal, pelas corporações profissionais, designadamente a dos pedreiros, em aspetos ligados por exemplo à regulação do exercício técnico, geográfico e económico da profissão e, inclusive, ao aspeto fiscalizatório, através da chamada Casa dos XXIV.

Contudo, não se pense que o corporativismo profissional em Portugal, orgânico e não superiormente imposto, não seja muito anterior ao tempo acima descrito, nem abranja

áreas tão exóticas, mesmo para os nossos dias, como asilos e hospitais próprios, seguros de saúde, de invalidez ou, mesmo, subsídios de funeral...

Numa perspetiva mais centro europeia, Christian Ludwig Steiglitz (1756-1836) ainda que para a época de 1820, no *“Ensaio sobre a Arquitetura Alemã Antiga”*, traça com grande exatidão a ascensão e o progresso desta classe profissional, cujo poder profissional levou os bispos a conferirem-lhe liberdade jurisdicional podendo deste modo os operários reconhecidos *quo tale*, circular livremente, poderes e faculdades essas, que as Guildas aproveitaram rapidamente para se auto-regulamentar e, consequentemente auto-blindar, quer no acesso ao conhecimento profissional, quer no acesso ao exercício da profissão e, consequentemente ao controlo, mesmo perante reis e eclesásticos, no âmbito do respetivo desempenho profissional.

Foi este facto que permitiu a disseminação de vários estilos arquitetónicos, do qual talvez possa dar-se o Gótico, como exemplo mais paradigmático, poético e, seguramente simbólico.

Os mestres pedreiros eram os responsáveis pela criação e construção das peças arquitetónicas, o seu processo de trabalho era definido segundo uma lógica de representação autográfica, pois intervinha(m) diretamente na realização da obra. Ao ato de pensar sucedia-se o ato de fazer, pelo que, a representação do objeto era assim se não rudimentar, pelo menos linear.

Os desenvolvimentos dos métodos de representação gráfica geraram um novo paradigma, no qual a representação assume um papel preponderante, embora este já estivesse presente antes, ainda que não com a mesma ponderação. O desenho assume a função de mediador entre a conceção e a construção. Esta nova metodologia configura um novo campo de atuação, o artesão e criador da peça arquitetónica afasta-se da construção, facultando-se do recurso a uma instrumentação alográfica da mesma.

A profissão de arquiteto emerge deste novo paradigma; o novo profissional vai ter assim, necessariamente uma formação diferente do mestre-pedreiro e novas preocupações filosóficas; o seu processo de criação não depende de qualquer manipulação feita em obra nem do ato de construir, depende antes (da vontade do mecenas, mas também e sobretudo) do ato de pensar. A nova metodologia dá primazia ao desenho, sendo este a reflexão antecipativa da realidade futura que ao gerar aquele, o torna desígnio de

conceção. A relevância do desenho é tal que Alberti afirma “*o desenho do edifício é o original e o edifício a sua cópia*” (Carpo, 2011: 26).

6.2.2 Condição de produção

A *produção artesanal* é entendida como uma produção que não estabelece nem garante à partida as características do produto final, se se quiser trata-se de “*trabalho realizado com recurso a qualquer técnica ou aparelho, no qual a qualidade do resultado não se encontra pré-determinado*”. Pye (1995:20) considera a palavra “artesanato” como “feito-à-mão”, a partir de uma visão historicista, e não social, embora em nosso entender possa até ser socialmente adaptativa. Para o autor, a condição manual implica por si, uma “produção de risco” (1995:9) pois associa a incerteza do resultado à qualidade final do produto.

A produção, resultante da condição manual, decorre unicamente do discernimento, cuidado e destreza do artesão, não sendo por isso capaz de se garantir à partida um nível de qualidade. Contrapõe à “produção de risco” a “produção de certeza”²⁹, e para ilustrar estas duas vertentes, recorre à comparação entre a escrita manual e a impressa.

No texto impresso todos os ajustes, reflexões, correção e revisão é anterior ao momento da produção do objeto, podendo este ser replicado na quantidade desejada. Já na escrita manual, o exercício mental decorre em simultâneo com o ato da produção, tendo este, um carácter único, portanto não sendo passível de ser replicável (embora paradoxalmente, possa ser copiado). O carácter rudimentar do processo de controlo da produção artesanal, implica que o artífice esteja “*constantemente a imaginar maneiras de limitar o risco, recorrendo a modelos e padrões*” (Pye, 1995:21).

Para Pye a análise do produto artesanal pode ser feita a dois níveis, os quais aliás se complementam; o nível performativo, que integra a “*retidão e graciosidade*” e a “*Habilidade para dar a expressão estética que o designer entendeu*” (Pye, 1995:30).

²⁹ Segundo Pye (1995:9), a “produção de certeza” resulta da capacidade de garantir um a qualidade de um resultado pré-determinado, estando para lá do controlo do operativo.

É ainda possível abordar o carácter estético através da “*diversidade*”, e este autor define a ideia de “*diversidade*”, como “a conjugação de diversos tipos de texturas, acabamentos diferenciados e atenções a detalhes numa mesma peça, expressando os propósitos intrínsecos da produção de risco” (Pye, 1995:35).

O artesão materializa, através da sua interpretação do processo representativo, da definição mental que o arquiteto detém do objeto criado. O desenho é assim a “*declaração da forma ideal do objeto a realizar*” . (Pye, 1995:31)

Segundo os ditames albertianos, a excelência do artesão é aferido pelo grau de aproximação entre a peça realizada e a ideia original que lhe deu forma. Isto evidencia a inter-relação entre a representação e a produção; o arquiteto, dependendo assim da sua capacidade de comunicação gráfica, fica em simultâneo dependente da destreza e capacidade de realização do artesão ou, como elegantemente diz Dormer, “*se o artesão não consegue fazer, então o desenhador não consegue especificar*” (Dormer, 1994:14).

Não obstante as limitações quantitativas do processo artesanal, a produção artesanal caracteriza-se como o ato de “*pensar através da ação*” (Dormer, 1994: 8), sendo a única e ligação entre a intenção e a expressão (1994: 9).

Apesar da morosidade e dos custos que lhe possam estar associados, as especificidades da condição manual permitiram alcançar a fabrico de componentes únicos, em pequenas quantidades. A sua capacidade de personalização faz com que ainda hoje seja utilizada para a produção de produtos individualizados com elevado valor acrescentado.

Outro aspeto não menos importante para o escopo da presente tese é que o carácter alográfico que emerge dos processos de representação desenvolvidos no Renascimento, introduz necessariamente entropias, em situações como a conceção e construção de superfícies curvas e formas complexas, pois estas são particularmente exigentes do ponto de vista geométrico, quer no mínimo nalguns aspetos da conceção, quer seguramente no capítulo do processo construtivo, o qual se revela frequentemente lento e atreito a imprecisões, não devendo escamotear-se ser o respetivo controlo decisivo para a implementação daquelas formas e superfícies.

O que não impediu, no entanto, de se criarem obras primas, nesta área e neste tempo, como a inimitável Santa Maria del Fiore, de Filippo Brunelleschi.

6.3 Condição de produção mecânica

A Revolução Industrial, que pode dizer-se ter início na segunda metade do séc. XVIII, traz com ela não só uma completa alteração das fontes motrizes do processo produtivo em geral, como também e por causa disso, um novo paradigma produtivo, baseado na mecanização, massificação e especialização de tarefas.

Segundo Michael Piore e Charles Sabel (Pine, 1993: 9-10) existem duas abordagens na utilização dos *processos mecânicos ao sistema de produção*.

Num dos modelos este segue os princípios do período antecedente, conservando o artesanato no centro do processo produtivo, apenas se recorrendo às ferramentas mecânicas, como forma de potenciação da capacidade produtiva.

Já na outra abordagem preconizada, a “produção em série”, tem-se como foco a redução dos custos associados ao fabrico, substituindo a força de trabalho humano por maquinaria especializada.

Estas duas abordagens podem ser exemplificadas pelos sistemas produtivos de empresas como Rolls-Royce e a Ford (Pine, 1993: 10).

A disseminação dos princípios da revolução industrial realizou-se de um modo desigual, uma vez que cada país de certa forma criou o seu próprio modelo fabril. Pine designa o modelo *norte-americano* como “*American System of Manufactures*” (Pine, 1993:10) destacando-se este não só pelos seus princípios, como também pela maquinaria especializada e a divisão de tarefas. No modelo em causa, o aumento da produtividade é feito através da quantidade, reduzindo progressivamente o papel do operário, o qual não deixa de ser fulcral no fabrico do produto.

Os índices de produtividade exigidos pelas grandes companhias americanas, eram superiores à capacidade produtiva instalada e, desta forma o “American System” seria materializado por Henry Ford no sistema de Produção em Série” (Pine, 1993: 5).

O modelo proposto por Ford alcança uma maior eficiência produtiva através da implementação da economia de escala: “*Quanto maior a companhia, maior é a produção, e menores são os custos*” (Pine, 1993: 16) e, logo, procura reduzir-se o tempo de produção através da especialização de mão de obra e da maquinaria.

Sobre a linha de montagem David Hounshell afirmava que esta “*levava o trabalho aos homens, (...) acelerando os homens lentos e abrandando os homens rápidos*” (Pine, 1993: 16). Obtinha-se assim a tão desejada uniformização a cadência o processo produtivo, através da segmentação do ciclo de produção, de modo a que as tarefas efetuadas por homens e máquinas fossem específicas e repetitivas, com isso promovendo a estabilização e uniformização, quer do processo, quer dos ritmos de produção; estes princípios irão estar na base do conceito de produto standardizado, que se vai consubstanciando historicamente aos poucos.

6.3.1 Arquitetura e a condição mecânica

A revolução produzida nos transportes pelos novos sistemas propulsores, redes viárias e as características dos novos materiais, criou o substrato necessário para o aparecimento da pré-fabricação.

Os novos materiais, a sistematização, uniformidade e rigor envolvidos na produção da arquitetura, permitiu a antecipação, a pré-visão do seu comportamento, através do recurso ao cálculo. Esta nova realidade permitiu a chegada de novas personagens ao sector que não eram “*guiados por preconceitos acerca das aparências*” (Kieran and Timberlake, 2004: 6) designadamente os engenheiros e os construtores.

Estes procuraram desde logo restringir o arquiteto ao exercício da conceção formal do edifício, não obstante a capacidade demonstrada pelos arquitetos modernistas em articular propostas e soluções arquitetónicas que enquadrassem e contextualizassem as limitações decorrentes da produção em série, causadas por uma standardização ainda embrionária e muito limitada.

Paulatinamente, a Arquitetura foi preparando-se para o fim do artesanato, procurando abrir lugar à racionalização, aos efeitos da industrialização e, designadamente à produção em série e à pré-fabricação.



Figura 6.1 – Estrutura modelar estandardizada, Crystal Palace 1851, Joseph Paxton
(Mugayar, B. “Arquitetura do Ferro” , 2011)

Precisamente, a produção em série, anuncia para Le Corbusier novos tempos para a arquitetura (Corbusier, 2006: 159). Este quadro mental, aliado às necessidades de reconstrução decorrentes da segunda guerra mundial (1940-1945), operam uma revolução na arquitetura, no modo de pensar e de construir. É neste contexto que Le Corbusier afirma que:

“As construções não serão mais eclosões esporádicas em que todos os problemas se complicam ao acumular; a organização financeira e social resolverá, com poderosos e acertados métodos, o problema da habitação, e as construções serão imensas, geridas e exploradas como administrações”. ...] permitindo desta forma “o emprego do elemento em série e a industrialização da construção. Cessaremos talvez em fim de construir sob medidas” (Corbusier 2006:166).

Os arquitetos começaram nos seus projetos a incorporar os sistemas e processos construtivos, fundamentados na utilização de soluções estandardizadas, o que otimizou o ciclo de construção, tornando-o mais rápida e eficaz. Os custos e o tempo de produção baixaram, tendo sido assim possível responder em tempo razoável e a custos mais acessíveis às necessidades de habitação existente no pós-guerra.

Os arquitetos viram-se confrontados com a necessidade de dar resposta às enormes carências habitacionais do pós-guerra, tendo encontrado resposta, no “*espírito de série*” adotado pela nova indústria. (Corbusier, 2006:159)

A casa passa a ser entendida como uma máquina, um objeto útil, fabricada mediante assemblagem de peças industrializadas, como um carro, um avião ou um barco. Le Corbusier declarou a necessidade de criar uma “Caixa de Elementos de Construção” que faria possível a industrialização da Arquitetura.

A standardização é o augúrio de uma nova era na arquitetura, o anunciado “espírito novo” (Corbusier, 2006: 159), implicando profundas alterações ideológicas e metodológicas. O fascínio pela “imaginação e a razão fria” (Corbusier, 2006: 71) faz emergir o funcionalismo habitacional, corporizado pelo conceito da “*machine à habiter*” e, de igual modo a linha de montagem de Ford influencia a metodologia e o modo de pensar a arquitetura, passando esta a ser um processo sequencial que pode assim até ser desfasado no tempo.

Os arquitetos do movimento moderno, incorporando o “espírito de série” da “nova indústria”, que disponibiliza novos materiais certificados e homogêneos, como o betão e o aço, começaram a apresentar soluções para tornarem a habitação mais acessível, produzidas a partir de componentes standardizados, em que padrões e rigor de produção dos materiais seguem especificações e geometrias normalizadas, substituindo deste modo o mais possível os constituintes “heterogêneos e duvidosos”, (Corbusier, 2006: 161).

Em virtude desta mudança de paradigma, o Arquiteto procura afastar a herança agora considerada algo nefasta da lógica albertiana, na qual o exercício da arquitetura é suportado pela capacidade de representação do desenho e pelo conhecimento tratadístico, na medida em que esta afasta de algum modo o arquiteto da obra e dos seus requisitos tecnológicos, os quais adquirem em função do que se referiu, uma nova ponderação .

Os materiais passam a ser utilizados numa lógica de aplicação direta no local de construção, sem qualquer tipo de transformação. Os edifícios deixam de ser construídos para passar a ser montados (Sousa, 2010: 24). A personalização é evitada, sendo tida, como um custo acrescido, que necessita de mão-de-obra especializada.

A condição de produção mecânica distingue-se da produção manual, por naquela se procurar a garantia previa da qualidade do produto a, afastando-se assim da referida “*produção de risco*”, medieval. Diferencia-se ainda pela velocidade de produção e pela busca da “*eficiência através da estabilidade e controlo*”, demonstrando-se à altura na produção de grandes quantidades, através de processos repetitivos e planeados, com recurso a máquinas especializadas.

6.3.2 Condição de produção

Deste modo, e incorporando o já referido conceito de “*produção de certeza*” na produção em grande quantidade, torna-se um processo capaz de antever o objeto final e controlar a qualidade previamente, afastando em grau cada vez maior a condição manual associada à “*produção de risco*” em última análise ao factor individual e casuístico.

A produção em série procura pois eliminar o risco do processo e, deste modo garantir a velocidade de produção assegurando “*eficiência através da estabilidade e controlo*”. (Pine, 1993: 28)

Porém, precisamente pelos aspetos referidos, pode igualmente concluir-se que embora a condição mecânica garanta através do recurso de maquinaria especializada a execução de tarefas repetitivas e planeadas, revelando-se consequentemente adequada à produção de grandes quantidades e de elementos repetitivos, precisamente por isso, a condição mecânica revela em contrapartida uma incapacidade de dar respostas personalizadas, de produzir produtos com um carácter expressivo e individualizado, atributos da *condição manual*.

Ou seja, são as suas virtualidades intrínsecas que paradoxalmente a tornam, pelo menos nesta fase menos adequada para responder às exigências da customização.

6.4 Condição de produção Digital

Os anos 60 e 70 do séc. XX, rompendo com a homogeneidade e com a distribuição de rendimentos igualitários, pelo menos fora da respetiva estratigrafia social, fazem emergir, quer no contexto intra estratigráfico, quer inter estratigráfico, uma

necessidade premente e permanente de diferenciação. Os fundamentos sociais que estiveram na base da produção em série, começam por isso desvanecer-se.

A estabilidade e prosperidade fordiana estava posta em causa, não só pelo contexto social, como também pelo aparecimento de novos métodos de produção, suportados pelos recentes avanços tecnológicos. Estes novos métodos começaram a ganhar terreno ao paradigma fordiano, revelando-se mais flexíveis e mesmo economicamente mais competitivos. Emergia assim um novo paradigma e como corretamente concluiu Pine: “*Quando um paradigma falha, é tempo de mudar para outro*”. (Pine, 1993: 32)

Alvin Toffler e Stanley Davis, proclamam ou, se se quiser, constataam o aparecimento da “*Era da Informação*”. Com efeito, a invenção e desenvolvimento do computador permitiu revolucionar os modos de conceção e produção, pondo progressivamente em causa a condição analógica, tradicional, manual e mecânica.

A expressão latina “computare”, está na origem da palavra computador da qual existem registo de ter sido utilizada em 1613, aludindo ao sujeito capaz de interpretar “cálculos ou computações”. Contudo, somente nos finais da década de 30 do séc. XX, foi efetivamente possível a Karl Zuse (1911 - 1995), construir um protótipo a que chama Z3 no qual consegue a integração das tecnologias que estão na base do computador. Estas máquinas têm contudo antecedentes historicamente muito honrados, desde Leibniz até ao Grego anónimo de Antiquitera.



Figura 6.2 – Réplica do computador Z3
 (“História of computing hardware”, 2013)

Este equipamento resulta da conjugação do *hardware* e do *software*, sendo o seu funcionamento resultado da interação destes dois componentes. Christian Wurster evoca que “as vantagens deste meio alternativo de processo de informação residem na sua velocidade, flexibilidade, programação”. (Sousa, 2010:27)

6.4.1 Arquitetura e a condição digital

Procurando aqui a vantagem de uma pequena contextualização, pode dizer-se que na história, desde o período barroco a meados do séc. XX, são inúmeros os exemplos que tentaram romper as grelhas cartesiana e os desígnios canónicos de beleza e proporção. (Kolarevic 2003:4)

Algumas formas, caracterizadas pela sua maior complexidade formal apresentam por isso mesmo uma maior dificuldade de representação e manipulação geométrica, o que tende a afastar os arquitetos da sua utilização, com isso se empobrecendo a diversidade espacial da arquitetura.

Mario Carpo aborda a vertente construtiva destas geometrias referindo que estas *“formas que são difíceis de desenhar e medir costumavam ser difíceis ou impossíveis de construir por notação.* (2011:31)

A utilização de geometrias complexas faz tornar evidentes as dificuldades acrescidas no campo da respetiva manipulação, representação e construção, sendo a capela de Ronchamp (1954) um claro exemplo das dificuldades existentes ao abordar este universo formal.

Com efeito, a intenção projetual inicial de Le Corbusier consistia na existência de um conjunto de volumes irregulares de carácter escultórico numa parte do templo. Porém, devido às dificuldades de representação, este criativo arquiteto, embora pleno de faculdades técnicas e artísticas, viu-se obrigado a abandonar a sua ideia inicial, tendo segundo Carpo, reformulado partes do projeto, por algo que “conseguisse desenhar” (Carpo, 2011: 31).

Ora, é precisamente aqui que, no atual estado em que nos encontramos, e mesmo que o cálculo matemático/geométrico possa efetivamente ser útil, e sê-lo-á certamente, as dificuldades entre a representação e a produção, podem beneficiar da ajuda de métodos empíricos de reconhecida eficácia, ainda que com limitações de outro tipo, podem ser, à falta de outro termo, “contornadas” pela retoma da lógica e organização autográfica do período medieval.

Mario Carpo, nesta linha de que o processo arquitetónico é cumulativo no saber, dizia que “se [o arquiteto] não consegue desenhar o que vai na sua mente de modo a que outros a façam por si, pode sempre tentar fazê-lo...” por si próprio, (Carpo, 2011: 31). Contudo, a Sagrada Família é neste domínio a afirmação dos riscos decorrentes da dependência da intervenção direta do autor no processo de construção.

O processo de trabalho de Antoni Gaudí na Sagrada Família, ou na cúpula da Colónia Güell são exemplos da adequação metodológica, pela qual aquele arquiteto abarca a conceção, o funcionamento estrutural e a construção.

Sola Morales (1942 - 2001) apontava como solução para estes problemas, o recurso à tecnologia. A esse efeito referia: *“a arquitetura dos tempos modernos é caracterizada pela sua capacidade de tirar partido de conquistas específicas dessa mesma modernidade: as inovações oferecidas pela ciência e tecnologia contemporânea”* (Kolarevic, 2003:3). A tecnologia apresenta-se cada vez mais como solução, ao colmatar as limitações e dificuldades dos processos representativos, ao facilitar a análise e cálculo, ao viabilizar e otimizar os processos de construção.

A utilização do computador como *“máquina de cálculo”* (Sousa, 2010:27) ocorreu pela primeira vez no projeto da Ópera de Sidney (1959 -1973) de Jørn Utzon (1918-2008). Esta ferramenta permitiu a resolução dos cálculos estruturais, decorrentes da utilização de seções esféricas. A importância do computador nesta tarefa é revelada por Ove Arup (1895-1988) e pelo seu associado Jack Zunz que afirmam que aquela não teria sido possível construir *“sem a utilização de computadores. Nós (Ove Arup) não poderíamos ter produzido a quantidade de informação, nem” ... “o trabalho analítico, necessário para erguer o edifício no tempo disponível”* (Sousa, 2010:28).

A utilização do computador era na altura muito centrada no cálculo matemático; consistindo em pouco mais do que uma mera ferramenta de cálculo e sem ofertas de *software* gráfico, apresentava por isso sérias limitações para despertar o interesse dos arquitetos, com uma forte cultura gráfica, e cujas práticas de representação eram baseadas na produção de desenhos e maquetas.

Foram necessárias quatro décadas até que o computador deixasse de ser entendido como uma *“máquina de cálculo”* e passasse a ser encarado como uma *“máquina para a computação (geométrica e informativa)”*. (Sousa, 2010:44)

O computador teve de evoluir do cálculo para a representação, para que fosse incorporado na prática específica do arquiteto e, neste contexto, a sua aplicação começou por replicar os processos de desenho e visualização da arquitetura. As aplicações computacionais para a arquitetura, apenas têm lugar na década de 90, tendo sido as práticas tradicionais progressivamente preteridas, em função dos processos de ideação e mutação suportados na computação. (Kolarevic, 2000:51)

As possibilidades de representação das novas ferramentas permitem explorar formas mais complexas, até aí difíceis de manipular, sem que isso se traduza num aumento quer da dificuldade quer do tempo de projeto. As superfícies desenvolvidas digitalmente apresentam uma elevada complexidade construtiva, a que a arquitetura respondeu importando soluções adotadas pelas indústrias náutica e automóvel, designadamente e a título de exemplo, as superfícies de dupla curvatura, criando moldes complementares e peças por prensagem, para dessa forma responder em termos de atrito e aerodinâmica.

É na sequência deste caminho que a arquitetura introduz no seu processo de construção “*softwares de engenharia*” e manufatura assistida por computador, respetivamente CAE e CAM, pelos quais as tecnologias aplicadas á arquitetura geram um sistema contínuo, que integra os ciclos de conceção e construção. Deste modo o desenho, o cálculo e a construção de formas complexas passam a poder ser suportados, de forma performante por uma plataforma que comeca a ser funcional.

Para Kolarevic:

“o que une arquitetos, designers e pensadores digitais não é o desejo de produzir formas compósitas – ‘blobify’³⁰, mas a aplicação da tecnologia digital como meio para integrar diretamente conceção e produção de maneiras sem precedentes desde os mestres construtores de tempos medievais”. (2003:4)

³⁰ Acrónimo de ‘*Binary Large Object*’, o termo “blob foi cunhado por Greg Lynn para descrever grandes formas digitais compósitas”.

Após as presentes considerações pode agora completar-se com melhor vantagem expositiva, o sentido e alcance das afirmações de Carpo, referidas supra, pois que o sentido do regresso ao modelo medievo é feito, com a salvaguarda de se evitar a “*produção de risco*”, através do recurso ao processo integrado CAD/CAM o qual ajuda a eliminar as falhas intrínsecas à condição manual, na medida em que o “*contínuo digital*” que estas ferramentas disponibilizam, possibilita uma “*produção de certeza*”, capaz de prever e garantir o controlo do processo e da qualidade das peças. Mario Carpo diz mesmo que “evocam um estado ideal de original, autográfico”. (Carpo, 2011:32)

Ao fundir de novamente, a representação e a construção, através de um contexto digital, estabelece-se um (novo) conceito, já anteriormente designado por “contínuo digital” na acepção de Kolarevic, aqui claramente assumido como conceito operativo-descriptivo (Kolarevic, 2003:3) porque melhor descreve e permite agir sobre a realidade subjacente e que vem por isso alterar o paradigma de interação entre a arquitetura e os “meios de produção” envolvidos, pois permite (re)introduzir a personalização, até então mais afastada do universo criado pela produção em série.

É o que se procurará abordar no capítulo seguinte.

6.4.2 Condição de produção

Até aos anos 80, existia uma dicotomia entre produção personalizada (condição manual) e a produção em série (condição mecânica) contudo, o desenvolvimento das tecnologias digitais, veio permitir uma coexistência dos conceitos, dando lugar àquilo que Alvin Toffer (1928-1916) (1971) chama de “*Personalização em Série*”.

Este novo conceito recorre a ilogismos, num “*mundo de paradoxos com implicações práticas*”, Davis (2012:140), o qual mostra através do ciclo de produção de uma camisa as implicações deste novo paradigma produtivo. O paradigma de produção em série, determina que a fabricação de qualquer camisa produzida segundo um quadro determinado de especificações, é implementada a partir de um ciclo único de produção, logo, um todo. Deste modo, poder-se-á dizer, pelo menos numa das aceções possíveis que, a fabricação de uma camisa personalizada, significa que “o todo” passa apenas a ser uma “parte”. Já segundo um paradigma manual, todas as camisas são únicas, e

encerram em si mesmo um ciclo de produção, assim a noção de todo é substituída pelo somatório das partes.

O desenvolvimento tecnológico abre um novo paradigma, através da utilização da tecnologia de controlo numérico computadorizado, vulgo CNC; nesta, a personalização de todas as peças passa a ser possível, já que, por este método cada camisa é em simultâneo “um todo” e “uma parte do todo”.

Pode dizer-se que a flexibilidade ajusta-se ao rigor e à eficiência, uma vez que este processo funde a personalização que advém da condição manual, com o rigor, fiabilidade e eficácia que decorre da fabricação em série, utilizando os conceitos de Pye, na caracterização do novo paradigma, é eliminada a “produção de risco” conciliando a personalização com a “produção de certeza”, deste modo *“a variedade já não compromete mais a eficiência e economia da produção”*. (Kolarevic, 2003:52)

O novo modelo operativo suporta-se em ferramentas digitais, em que os seus processos de representação possibilitam a verificação e análise do objeto em ambiente digital, diminuindo os fatores de risco e conferindo uma maior segurança, através do processo de fabricação digital.

Este “*contínuo digital*” elimina os constrangimentos da produção industrial, decorrentes da falta de diferenciação dos produtos, os quais respondem de igual modo a todas as necessidades, maxime o conceito de standardização, dando-se aqui lugar à personalização em série.

Através de variações controladas digitalmente, é possível promover a fabricação diferenciada. De certa forma, e parafraseando Gershenfeld, pode acompanhar-se este pensador e mesmo tentar ir mais longe, aventando que, hoje *“tal futuro representa um retorno às nossas raízes industriais...” e mesmo pré-industriais,, “antes de a arte ser separada dos artesãos, quando a produção era feita...” por e “para os indivíduos ao invés de massas”*.(Gershenfeld, 2007:8)

A aplicação da tecnologia aos vários ciclos da arquitetura, comporta o desenvolvimento de componentes únicos na sua tipologia, mas que se pretendem sejam produzidos em massa;. Esta personalização em série responde às necessidades variáveis da construção de superfícies curvas e de dupla curvatura e, em virtude do controlo das diferentes variáveis e variabilidades, é possível baixar o respectivo custo e tempo de

produção, desta forma integrando eficaz, confortável e economicamente as superfícies curvas no processo construtivo.

É, por exemplo, o que vem acontecendo em áreas como a aeronáutica ou a produção automóvel. Deste modo, é possível concluir que o contínuo digital decorrente da associação das tecnologias CAD/CAM ao processo de conceção e construção, viabiliza e amplifica o universo formal da arquitetura contemporânea. (Sousa and Duarte, 2005)

6.5 Fabricação digital

O rápido desenvolvimento tecnológico tem vindo a mudar a metodologia conceptual da Arquitetura nas últimas décadas. A aplicação das ferramentas digitais no processo de projeto confere aos arquitetos a capacidade de superar algumas das dificuldades decorrentes da complexidade formal. Atualmente, a tecnologia digital possibilita a articulação da conceção do projeto com construção incluindo os momentos intermediários como são a produção de maquetes e protótipos de um modo rápido, eficiente e económico.

Nas lógicas mais tradicionais, o controlo do projeto da fabricação e da construção eram centralizadas numa só pessoa, diminuindo a necessidade da representação da peça. Com a especialização e a separação dos diferentes ciclos inerentes à conceção e execução, os processos de representação tornam-se fundamentais para implementação da peça arquitetónica. Os novos processos de conceção e representação têm vindo a diminuir a importância do desenho técnico, sendo este substituído por informação digital que permite a utilização de processos automatizados de produção.

Os dispositivos de produção controlados numericamente podem utilizar a informação dos processos de representação utilizados pelos projetistas e, de igual forma, scanners 3D podem ser utilizados para a criação de modelos geométricos digitais a partir de modelos físicos.

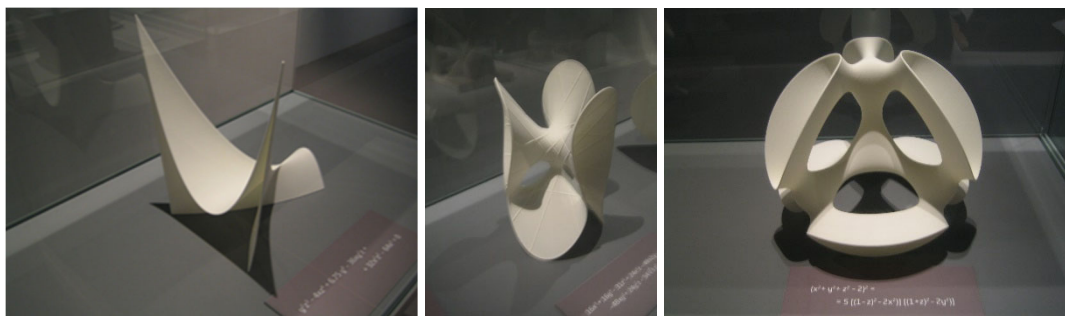


Figura 6.3 – Superfícies cúbicas obtidas a partir de impressão 3D, resultam de uma fórmula de terceiro grau com 21 coeficientes
(Exposição formas e formulas, Museu Nacional de História Natural e da Ciência, 2013)

O sistema CAD – *computer-aided design* permite a execução de modelos geométricos das peças arquitetônicas a executar, decorrendo o caráter inovador destas ferramentas da capacidade de interligar o processo de representação com parte integrante do processo de produção.

Nele, os arquitetos recorrem a softwares na criação de formas complexas, pois estas ferramentas contêm informações essenciais para a produção de maquetas físicas ou para a fabricação de peças. Trata-se de um acontecimento pelo qual as novas tecnologias trazem à ideação do projeto uma visão holística, revolucionando o modo como se “produz, avalia, fabrica e constrói”.

A tecnologia é um catalisador de novas ideias na arquitetura (Klinger, 2007: 300). Os novos processos de produção da arquitetura associadas à tecnologia digital, são grandes aliados e facilitadores da inovação formal dos projetos e da sua fabricação e da construção, conseguindo reduzir o tempo de execução do projeto, facilitando a compreensão e manipulação da forma, em sùmula, otimizando o ciclo construtivo.

A representação tridimensional e os modelos físicos permitem alcançar níveis de ainda maior consciência, plasmada no objeto arquitetônico, relevando e permitindo trabalhar o objeto, a sua expressão formal, a sua proporção, bem como a sua adequação às funcionalidades inerentes ao programa, algo dificilmente evidenciado, ou mesmo evidenciável, através de uma representação bidimensional, como anteriormente.

Este substrato tecnológico é responsável, não só pelo desenvolvimento de novos “vocabulários” a nível do projeto, clarificando, densificando e potenciando a respetiva expressão e controlo formal, como, também pela realização de modelos e protótipos, já

que o avanço no capítulo do software permite uma abordagem mais interativa e amigável, na transposição do desenho para a maquete física.

Esta capacidade, revelada pelos processos automatizados de manufatura, ao possibilitar transformar modelos digitais em modelos físicos, permitiu consequentemente um aumento na complexidade formal dos projetos, abrindo ainda, só por si, novas possibilidades de experimentação.

A inovação tecnológica apresenta vários processos de produção digital que permitem a execução de maquetas, protótipos e componentes com base em modelos desenhados digitalmente. A utilização de modo integrado do software e hardware viabiliza o desenvolvimento de formas de complexidade elevada, e que jamais poderiam ser concebidas com os anteriores métodos conceptuais, ditos, tradicionais de representação e maquetagem.

O quadro instrumental disponibilizado pelas ferramentas digitais permite assim abordar o universo das formas curvas, de modo a colmatar as inerentes dificuldades operativas, quer no domínio da conceção, quer no domínio da sua implantação construtiva, constituindo-se como uma possibilidade efetiva de tornar estas formas estruturais mais presentes enriquecendo assim o universo formal e espacial da arquitetura.

A exploração destas tecnologias tem vindo a aumentar, quer no âmbito académico quer no âmbito profissional. Os arquitetos na sua prática profissional desenvolveram abordagens generativas computacionais, recorreram a robôs para a imbricagem de componentes, investigaram técnicas de fabricação aditivas, no domínio criativo os processos computacionais, possibilitaram combinar o cálculo e a representação, sucessivamente configurando deste modo novos paradigmas conceptuais. Sousa afirma que *“o digital emerge assim como um ambiente criativo que apoia o desenho colaborativo entre o arquiteto e o computador”*. (Sousa 2010: 142)

A maior flexibilidade de processos permite que as técnicas digitais suportem a personalização em série, possibilitando a representação, a análise e a fabricação de e geometrias com maior grau de complexidade, nas quais se inserem as superfícies curva e de dupla curvatura. São essas realidades que abordaremos seguidamente.

6.5.1 Definições de prototipagem digital e fabricação digital

Os termos “*Prototipagem Rápida*” e “*Fabricação Digital*” são os mais comuns na literatura de referência, contudo, as definições e a terminologia utilizada na descrição das novas tecnologias de produção na arquitetura; não são consensuais, existindo várias nomenclaturas de classificação para as técnicas existentes.

Prototipagem Digital	Fabricação Digital
<ul style="list-style-type: none"> - Prototipagem Rápida <ul style="list-style-type: none"> . Sólido . Líquido . Pó . Lâmina - Corte a laser - Milling - Corte em vinil 	<ul style="list-style-type: none"> - File-to-factory - Metal Bending - Tube Bending - CNC
Produtos	
Maquetes	Formas
Protótipos 1:1	Peças Finais

Tabela 6.1 – Campo de utilização da prototipagem rápida e da fabricação digital

(técnicas de prototipagem digital para arquitetura Regiane Pupo, Graphica’09, 2009)

Segundo Regiane Pupo e Gabriela Celani (2009), a prototipagem rápida consiste na produção de maquetes em escalas reduzidas ou protótipos à escala real, utilizando para tal a sobreposição de camadas, cortadas a laser ou fresas. Já a fabricação digital inclui processos para a produção de edifícios das suas componentes recorrendo a opções como, *file to-factory metal* e *tube bending*. Estas destinam-se à produção de componentes ou peças, recorrendo a equipamentos de Controlo Numérico Computorizado – CNC.

O termo “projeto digital” (em inglês *digital design*) acolhe vários significados e definições. Segundo Sass e Oxman:

“Frequentemente, o termo, em arquitetura, tem sido associado à representação e manipulação de formas e espaços complexos. Entretanto, o conceito de projeto digital integrado, sugere que todo o processo tenha

sido exclusivamente elaborado em ambiente computacional e difere do projeto elaborado em suporte papel”. (Sass e Oxman 2006: 333)

Urge contextualizar a prototipagem digital ao longo do processo de conceção digital, bem como as suas implicações nas novas formas de conceber e produzir arquitetura.

6.5.2 Prototipagem Rápida

A “*prototipagem rápida*” (*rapid prototyping*) adequa-se segundo Buswell et al. (2007) à produção de modelos físicos de pequena escala. Estes processos oferecem diversas vantagens, a comparação dos processos de fabricação clássicos baseados em subtração de material, feitos por fresas e tornos, permitem aos arquitetos produzir rapidamente protótipos dos seus projetos e, ao invés dos desenhos, as maquetas apresentam diversos usos, constituindo-se numa ajuda durante a apresentação do projeto aos colaboradores e clientes.

Algumas das utilizações, têm como função visualizar as peças e protótipos, sem que exista qualquer comprometimento funcional, sendo estes designados, como modeladores conceptuais (*Concept Modeler*). Estes modelos físicos destinam-se a uma abordagem analítica, sendo submetidos a um conjunto de testes prévios, tais como, estudos de iluminação natural, ensaios em túnel de vento, ou a análise fotoelástica, permite verificar os pontos de tensões mais elevados na peça. Deste modo permitindo o desenvolvimento do projeto, identificam-se precocemente os erros de conceção.

No âmbito das formas curvas e de dupla curvatura, é seguramente uma importante ferramenta conceptual pois permite explorar o funcionamento estrutural da forma, verificando o seu equilíbrio numa escala mais reduzida.

Wohlers (2008) considera precisamente os “*modeladores conceptuais*” como ferramentas de representação utilizadas nas primeiras fases de projeto é possível fazer uma analogia na qual “*se o modelo físico é o ápice da representação arquitetónica, então o modelador conceptual pode ser comparado a um croqui rápido num guardanapo*”.

Os arquitetos desde sempre recorreram a protótipos e, portanto, os denominados *processos de prototipagem rápida* possibilitam apenas que estes sejam produzidos de um modo rápido e económico. Ademite-se que a economia de tempo e de custos decorrentes da construção de modelos com estas técnicas, seja da ordem de 70 a 90%.

Os métodos desenvolvidos destinavam-se originalmente à produção rápida de modelos prototipados, sendo que o termo “rápido”, alude ao facto desses sistemas não solicitarem a intervenção humana, o que normalmente requeria longos períodos para fabricar um protótipo.

Estas técnicas de prototipagem permitem uma maior celeridade e, dependendo da complexidade e tamanho do protótipo, a sua manufatura pode levar em média entre 3 a 72 horas. O avanço da tecnologia culminou na existência de inúmeros equipamentos e softwares, no entendimento minucioso dos respetivos limites, bem como das capacidades e possibilidades de cada ferramenta.

A prototipagem rápida assme-se contudo como o melhor opção de produção, quando é necessário produzir pequenos lotes, evitando os custos de produção decorrentes da produção em série (e.g., moldes, fieiras) revelando-se igualmente útil na produção de componentes de especial complexidade, quando a sua materialização seja possível de contemplar pelas técnicas de prototipagem disponíveis. (Regiane and Gabriela, 2009)

6.5.3 Processos de fabricação aditiva

Face à panóplia de software e hardware existentes torna-se evidente a necessidade de segmentação, destas ferramentas, direcionando as suas características em função das tarefas a realizar; deste modo, as características do modelo determinarão o sucesso ou a limitação da tecnologia aplicada, definindo a aplicabilidade destas ferramentas.

Este processo apresenta uma grande disseminação, quer no âmbito profissional através de máquinas sofisticadas, quer nos processos definidos por estas o que permite a produção de peças em vários tipos de materiais. No uso doméstico os dispositivos são mais simples e normalmente vinculados ao processo FDM - (*Fused Deposition Modeling*), ou deposição de material fundido.

Num vasto universo de tecnologias e processos de fabricação aditiva são aqui descritos um conjunto de técnicas que podem auxiliar ao exercício projetual da arquitetura, tendo estas tecnologias sido divididas em função dos materiais que utilizam no processo de fabricação:

1. Sólidos;
2. Líquidos;
3. Pó.

Esta nomenclatura baseia-se no estado inicial da matéria prima, existindo porém autores que agrupam os processos em quatro categorias, autonomizando os casos baseados empilhamento de lâminas, apesar do estado dos materiais ser sólido, do qual são exemplo: LOM (*Laminated Object Manufacturing*) – Manufatura de objetos laminados PLT (*Paper Lamination Technology*) – Tecnologia em Laminação de Papel.

Para Saura (2009), devido ao seu ciclo de produção não se podem incluir na categoria dos processos aditivos, também não são igualmente considerado como um processo de prototipagem rápida. Esses autores apenas consideram como prototipagem rápida, um processo no qual são utilizados equipamentos que não envolvam a força humana na produção das peças.

A nomenclatura adoptada segue a classificação de Sousa. Assim:

Processos de Fabricação Aditiva	
Líquidos	<ul style="list-style-type: none"> • Estereolitografia (SLA)* • Sistema de Jato* • Direct Light Processing™ Technologies • Jato de Alta Viscosidade • The Maple Process
Pó	<ul style="list-style-type: none"> • Sinterização Seletiva a Laser (SLS)* • Sinterização Metálica Direta a Laser • Impressão Tridimensional (3DP)* • Sistemas de Deposição de Metal Fundido • Fusão Seletiva a Laser • Sinterização Disfarçada Seletiva (SMS) • Sinterização Inibida Seletiva (SIS) • Fabricação por Camadas Electrofotográficas (ELM) • Sinterização de Alta Velocidade (HSS)
Sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM)* • Tecnologias de empilhamento de folhas*

Tabela 6.2 – Técnicas de fabricação aditiva, Classificação de acordo com a nomenclatura de Sousa
 (“From digital to Material”, 2009)

No caso dos processos aditivos por impressão é conveniente, estabelecer previamente uma escala para a impressão do modelo 3D, respeitando o tamanho máximo que a máquina executa. O ajuste da escala, pode pôr em causa a viabilidade da maquete, visto que a espessura obtida pode ser diminuta, tornando-a frágil.

Não obstante a tecnologia adotada, a execução dos processos aditivos segue uma sequência que começa com a preparação do ficheiro em formato STL (Stereolithography), o que implica a manipulação e o pós processamento da peça.

As técnicas disponibilizadas comercialmente consistem num software que decompõe o o modelo desenhado em CAD, em camadas com cerca de 0,1mm de espessura, as quais são posteriormente dispostas uma sobre a outra. O objeto criado resulta de camadas sucessivas de cera ou plástico.

O processo aditivo permite suportar a criação e execução de objetos com características internas de elevada complexidade, estas não podem ser produzidas com base em outros processos como, por exemplo, fresagem, furação, torneamento, etc., designados por processos subtrativos, ou seja, a partir de um bloco sólido é removido material.

Os sistemas aditivos apresentam algumas condicionantes, sendo que uma delas é a dimensão do protótipo. Tendo como limite padrão 0,125 m³ em alguns casos menos, dependendo do equipamento a utilizar. A execução de protótipos com certas materiais como o metal é difícil, no que pode ser visto como uma das limitações desta tecnologia.

Para Volpato et al. (2007:102), as tecnologias baseadas na adição de material, camada após camada, apresentam um processo idêntico para todos os processos e resumem-se em cinco passos básicos:

1. Criação de um modelo CAD da peça projetada;
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para leitura estereolitografia;
3. Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. Construção física do modelo, ou empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. Limpeza e acabamento do protótipo.

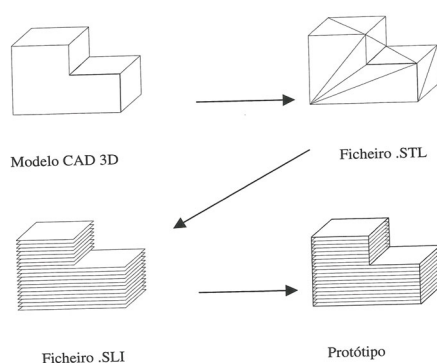


Figura 6.4 – Criação de protótipo, ciclo dos processos de fabricação aditiva
 (“Prototipagem rápida Faculdade de Engenharia do Porto”, 2015)

O ciclo de produção e as etapas que o constituem são sempre as mesmas, variando o material utilizado, os tempos de impressão e de acabamento, bem como o procedimento de acabamento.

A fase seguinte passa pelo planeamento do processo de prototipagem, a executar pelo software do equipamento de prototipagem. Nessa etapa, o software tem a função de:

1. Verificar a integridade do arquivo STL;
2. Definir os suportes para peças em balanço, quando necessário;
3. Definir parâmetros como escala, tempo de execução, posição e orientação do objeto.

Cada sistema tem rotinas específicas na fabricação da peça, camada a camada. A última etapa é a do acabamento, a qual pode consistir no polimento ou afagamento, resinagem ou uma pintura da peça.

Em suma, os estes métodos de prototipagem rápida apresentam um enorme impacto na realização de maquetas e protótipos, sendo uma ferramenta conceptual de grande valia pois a mesma permite a fácil materialização de formas complexas, que através de outros processos seria de difícil execução, constituindo-se ainda numa ferramenta de grande eficácia para reduzir o tempo de produção.

6.5.4 Processos de fabricação subtrativos

Esta catégoria tem como suporte tecnológico é de ferramentas na sua maioria de origem fabril ou industrial, como fresas, serras circulares e tornos, decorre, a sua evolução permitiu teorizar e evoluir para a fabricação digital.



Figura 6.5 – De Young Museum, São Francisco, California, 2005, Herzog & de Meuron
(ArchDaily, 2012)

Os processos de subtrativos de fabricação são aplicados na produção de maquetas, através da recorrem a fresas e corte com máquinas CNC ou através de jatos de água e laser, controlados por computador para a fabricação de peças à escala real, em vários tipo de materiais. É assim possível desenvolver soluções para aplicação arquitetónica, tais como painéis, com geometrias e texturas personalizadas.

Estes meios permitem utilizar materiais semelhantes ou iguais à peça projetada, o que permite analisar e testar o performance do projeto, através de testes de “conforto ambiental, acústico, iluminação e ventilação ou ainda proporcionar testes ergonómicos, podendo ainda ser uma ferramenta de comunicação do projeto”.

Processos de Fabricação Digital Subtrativa				
Mecânico			Térmico	Electroquímico
Sem formação de aparas	Formação de aparas	Abrasivo		
Cisalhamento Punção Apagamento	Furação Corte Serração Perfuração Torneação Fresagem Roteamento	Moagem Jato de água Corte a jato abrasivo Maquinação ultrasónica	Laser Plasma Gás oxi-combustível Fio quente Maquinação por descarga elétrica (EDM)	Electroquímico Fotoquímico Fresagem química

Tabela 6.3 – Técnicas de fabricação subtrativas, Classificação de acordo com a nomenclatura de Sousa
(“From digital to Material”, 2009)

Estes equipamentos operam a partir de métodos subtrativos de produção, utilizando fresas para desbastar material sob a forma de blocos ou chapas. Os processos subtrativos resultam da remoção de material numa quantidade específica de modo a atingir a configuração desejada.

Para Schodek (2005:241) parafraseando Miguel Ângelo “*a ideia de base é conceber algo útil e esculpir todo o material até que só o objeto persista*”, percorrendo um conjunto de percursos pré-definidos – *toolpaths*, que são determinados pelo *software* CAM a partir do modelo digital.

O tamanho das peças e dos protótipos desenvolvidos está condicionado pela dimensão dos equipamentos utilizados, sendo uma clara limitação destes sistemas na produção de componentes de carácter arquitetónico, pois a respetiva dimensão tende a exigir dispositivos capazes de operar a outra escala. Além disso, estes processos revelam-se ainda morosos, devido ao tempo de fresagem, sendo de considerar ainda o desgaste do equipamento e a produção de desperdícios.

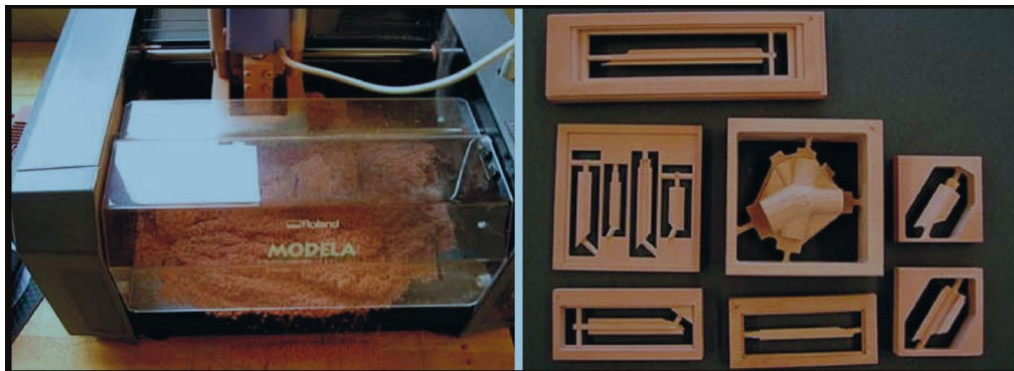


Figura 6.6 – Fresadora Modelo Miller com exemplos de aplicação em madeira
(Celani G. “Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura”, 2005)



Figura 6.7 – Fresadora Denford Miller com exemplos de aplicação em metal
 (“Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura”, 2005)

Apesar das primeiras realizações usando estas técnicas no âmbito da arquitetura datarem dos anos 70, as realizações mais notáveis, contudo, foram produzidas recentemente em pedra para a catedral de Saint John the Divine em Nova York e para as colunas da catedral da Sagrada Família em Barcelona.

Já a primeira utilização de processos de personalização em série teve lugar no Disney Concert Hall em Los Angeles. A geometria complexa deste projeto realizado por Frank Gehry foi gerida com um sistema de modelação usado pela aeronáutica, tendo o modelo de CAD sido usado para controlar a maquinagem das peças de revestimento dos volumes.

Na tecnologia de corte a laser torna-se importante a definição métrica do objeto – (escala, espessura, dimensão máxima e mínima, materiais a serem utilizados. Neste sistema revela-se igualmente importante articular entre si as peças a cortar, bem como a dimensão do equipamento de corte e o ajuste da potência do feixe do laser ao material a cortar.

A densidade do material, assim como a sua espessura. O corte, ou vinco, do material requerem uma intensidade do feixe do laser. O processo deve iniciar-se através da realização de alguns testes que envolvam o material a utilizar e as definições de corte do equipamento, por forma a antever a qualidade e especificações do corte a realizar, seguindo-se o corte das peças e subsequente montagem do objeto, cumprindo o planeamento pré-estabelecido.

A execução destas tarefas deve revestir-se de especiais cuidados de segurança, dado que os materiais postos a corte são por vezes altamente combustíveis ao entrar em contacto com o feixe do laser.

A aplicação desta tecnologia no âmbito da arquitetura apresenta mais-valias no ciclo de projeto através da realização de maquetas; já no ciclo de construção, a sua aplicação revela-se particularmente adequada na produção de componentes à escala real para formas complexas ou para formas pouco repetitivas, as quais encontram neste processo um modo eficaz e económico de produção.

6.5.5 Processos de Fabricação Formativa

As técnicas de fabricação formativa são muito distintas dos processos subtrativos e aditivos referidos anteriormente. Esta tecnologia baseia-se na deformação do material, até obter a forma projetada. Este tipo de processos por necessitarem de moldes personalizados são bastante dispendiosos e complexos. Por esse facto são muitas vezes associados a processos repetitivos ou combinatórios.

Deste modo um único ou um pequeno conjunto de moldes podem permitir a fabricação de vários produtos. No âmbito da produção arquitetónica, existem processos para a execução de moldes, como o FlexiMold™ desenvolvido por Sebastiaan Boers, capazes de serem reconfigurados com recurso a um software, que posiciona os pinos automaticamente sendo possível em alguns minutos gerar uma superfície, em que cada um dos pinos pode assumir uma nova posição e deste modo reconfigurar a geometria, a malha de pinos é controlada por CNC.

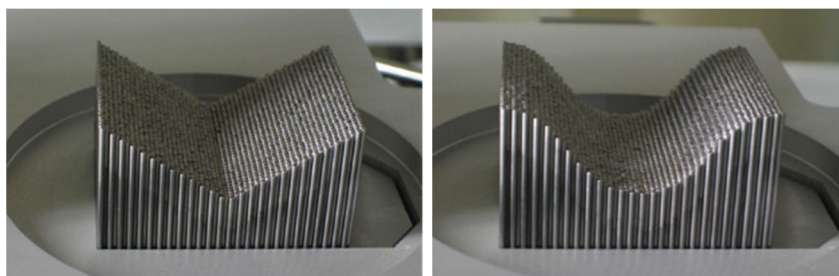


Figura 6.8 – Superfícies geradas pelo sistema FlexiMoldt
("Técnicas de prototipagem digital para Arquitetura", 2005)

Como facilmente se consegue depreender da imagem, consegue reconfigurar-se o modelo de modo automático num curto espaço de tempo, cada pino pode assumir diferentes posições, uma vez que o seu posicionamento é individualizado.

Procurando descrever e contextualizar de forma sucinta, os procedimentos relativos aos processos de fabricação formativa, Sousa elaborou a tabela comparativa que, infra, se transcreve:

Fabricação Formativa			
	Estado Líquido	Estado Plástico	Estado Sólido
Metais	<i>Molde dispensável</i> Moldagem em areia Moldagem de molde completa (fundição de padrão evaporativo) Moldagem de precisão Moldes de gesso Moldagem em moldes cerâmicos Moldes de cerâmica <i>Molde não dispensável</i> Moldes em grafite Moldes permanentes (metal) Moldagem de baixa pressão Moldagem a vácuo Moldagem de injeção de metal Moldagem contínua	<i>Forjamento</i> Martelo Forja Prensa Estampagem rotativa <i>Laminagem</i> Laminagem a frio Laminagem a quente <i>Perfilados</i> <i>Extrusão</i> Extrusão direta Extrusão por impacto	<i>Quinagem simples</i> Quinagem e forma de arame Quinagem de tubos Quinagem de placas metálicas Rolo de quinagem e formação Formação por extensão Raio laser <i>Forma composta</i> Fiação Hidroformagem Formação explosiva Cunhar 'Peening' <i>Forma e corte</i> Estampagem
Plásticos	Moldagem Moldagem de contato Moldagem BMC Moldagem de injeção Moldagem de compressão Moldagem de transferência Moldagem rotacional Extrusão	Moldagem de grânulo Expandido Termoformação Moldagem por sopro	Quinagem Cunhar Forjamento Extrusão Rolamento

Tabela 6.4 – Técnicas de fabricação formativa, Classificação de acordo com a nomenclatura de Sousa
 ("From digital to Material", 2009)

Os processos formativos têm sido utilizados em situação de produção de superfícies curvas, em que a flexão dos materiais é controlada por ferramentas digitais. Apesar da flexibilidade do processo permitir a modelação de vários materiais, com um largo espectro formal e não obstante o suporte digital, estes apresentam algumas dificuldades em ser automatizados, pois requerem tratamento adaptativo e individualizado dos diversos elementos geradores da forma que se destinam a posterior prensagem; Michael Samra (Sousa, 2010:131) afirma que “*este processo analógico é, em várias maneiras, a completa antítese das tecnologias CAD/CAM*” porque enquanto o CAM lê automaticamente o desenho CAD, esta metodologia, enquanto analógico, obriga à sua (re)configuração manual.

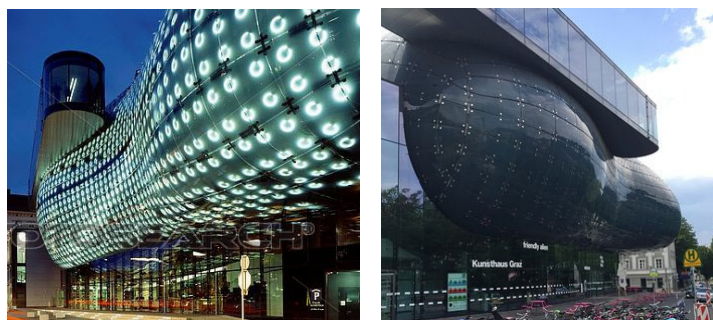


Figura 6.9 — Kunsthaus, Graz, Austria, 2003 , Spacelab Cook-Fournier
(Precedence Study Kunsthaus, n.d.)

6.5.6 Processos de Fabricação Robótica

A fabricação robótica por seu lado tem conhecido uma utilização crescente. Os braços robóticos, permitem otimizar os diversos processos de fabricação digital. Uma vez que o *robot* pela sua precisão e mobilidade espacial, possibilita a realização de várias tarefas, é assim possível associar ao braço robótico processos de fabricação aditivos, subtrativos e formativos, em função do equipamento ou ferramenta cupulada à ao braço robótico – *end-effector*.



Figura 6.10 – A superfície complexa foi fabricada através de processos subtrativos de fresagem robótica de blocos de madeira, Norwegian Wild Reindeer Center (2011) dos Snøhetta
(“Arquitetura e Personalização o Impacto das Tecnologias CAD/CAM”, 2012)

A aparelhagem do *robot* permite que este possa interagir com o meio, sendo possível juntar ao braço de fresas, garras, serras, de acordo com as funções a executar. A fabricação robótica não só permite a realização das tarefas de fabricação personalizada, como também permite a execução de montagem de componentes e o posicionamento de peças.

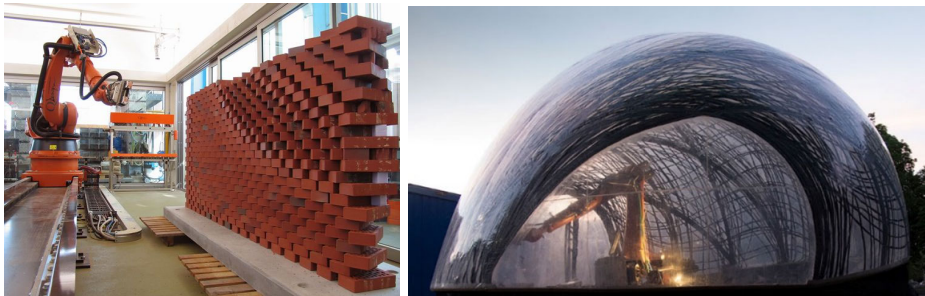


Figura 6.11 – Utilização de braço robótico
(“Arquitetura Industrial, Bloco, Tijolos”, 2013)

Gramazio & Kohler desenvolveram um trabalho no sentido da procura de processos de “acoplar diretamente a realidade virtual e a física” (Bonwetsch et. al, 2006). Esta ferramenta apresenta um elevado potencial de realização, já que a sua versatilidade e precisão permitem produzir as peças sem que estas sejam reposicionadas, sendo possível a realização de peças de elevada complexidade com níveis de precisão superiores a outros processos.



Figura 6.12 – Gantenbein Vineyard (Gramazio + Kohler). Processo de pré-fabricação robótica dos painéis de alvenaria de tijolo.

(Kohler, G. “Gantenbein Vineyard Facade, Fläsch, Switzerland. Non-Standardised Brick Façade”, 2016)

Os arquitetos suíços Fabio Gramazio e Matthias Kohler, (ETH) – Zurique, realizaram em 2006 o projeto Gantenbein Vineyard Facade, em que o braço mecânico foi utilizado para a realização de um modelo físico partindo de um modelo digital, através da colocação de peças de cerâmica standardizadas.

Este processo revela-se particularmente vantajoso, pois o braço mecânico apresenta uma enorme mobilidade no espaço e, deste modo as peças podem ser modeladas sem necessidade de serem reposicionadas, durante o processo de produção, aumentando assim não só a rapidez de execução, como também a precisão e o rigor da peça produzida.

Capítulo 7 – Alvenaria cerâmica

7.1 Introdução

Este capítulo passa em revista os casos que contribuíram para a compreensão e fundamentação da metodologia gerada por esta tese, a qual, como se recorda, aborda a conceção e construção de superfícies curvas e de dupla curvatura.

A metodologia desenhada resulta das várias dimensões envolvidas, quer no processo de conceção, quer no processo de construção. As diferentes abordagens às superfícies curvas e de dupla curvatura integram aspetos, tecnológicos, de índole plástica, económica, filosófica, social, cultural, ideológica e sociológica, as quais de algum modo expressam as ansiedades ilusões e desígnios do seu tempo e das suas comunidades.

O estudo foca-se em projetistas, investigadores e técnicas, cuja metodologia e conhecimento foram capazes de produzir inovação ao nível do projeto e da construção destas superfícies.

Neste capítulo pretende-se mapear os requisitos envolvidos na conceção e construção, de modo a estruturar e operacionalizar uma metodologia capaz de abordar e expressar com eficácia as especificidades deste universo formal. A riqueza destas formas decorre da interligação entre o material, a geometria e a técnica construtiva, conducentes ao vão produzido.

As componentes tectónicas e conceituais estruturam-se como as mais relevantes na escolha dos casos de estudo analisados por esta tese. Procura-se através desta pesquisa documentar os métodos utilizados na abordagem das geometrias curvas; a nível dos processos de pesquisa e otimização formal, i.e., *form-finding*, dos meios de conceção, dos materiais e técnicas utilizados e da sua influência no processo construtivo e produtivo.

Na escolha destes exemplos estiveram presentes critérios como a tipologia, a tecnologia enquanto contributo para a carga simbólica e significação do objeto arquitetónico, o sistema construtivo e estrutural, bem como, e como não podia deixar de ser, o processo de conceção e construção.

À dimensão tecnológica, de carácter mais objetivo, junta-se a dimensão cultural e simbólica, expressadas pela técnica e pelo material. É esta articulação das diferentes dimensões que enriquece a metodologia e consequentemente a própria arquitetura.

7.2 Alvenaria Estrutural até ao séc. XIX

As abóbadas são uma tipologia estrutural básica cuja, origem remonta ao tempo dos Romanos e dos Árabes – técnica persa dos arquitetos sassânidas. A área de implantação desta tipologia estrutural e processo construtivo resulta da disseminação destes impérios, bem como da sua influência cultural subsequente.

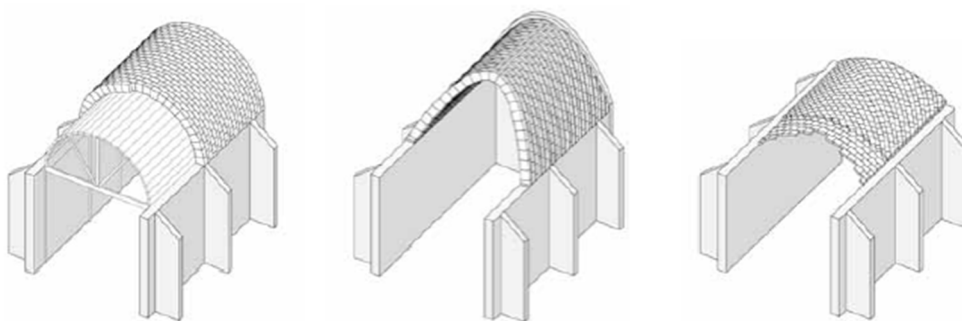


Figura 7.1 – Abóbada romana com cofragem, abóbada Núbia, abóbada catalã
 ("Detail Zeitschrift für Architektur Review of Architecture 53", 2013)

As abóbadas de alvenaria estrutural são um processo tecnológico ancestral resultante da necessidade de dar resposta às dificuldades em produzir trações, que os materiais com um baixo índice tecnológico apresentam. Estas limitações foram ultrapassadas pela manipulação geométrica da forma, a qual gerou o funcionamento estrutural e o equilíbrio necessário à produção de espaço arquitetónico, entenda-se, o vão.

As diversas técnicas construtivas desenvolvidas, para a respectiva materialização mostraram ser progressivamente capazes de articular a complexidade geométrica da forma com o processo construtivo e a tolerância construtiva necessária. Foi assim possível alcançar vãos de grande dimensão, que funcionam exclusivamente à compressão.

A gestão geométrica da forma permite um controlo do funcionamento estrutural do

artefacto arquitetónico, o qual, ao requerer menos material na sua composição, permite no caso concreto alcançar soluções de abóbadas com apenas 2 cm de espessura sem necessidade de reforço estrutural.

7.3 Alvenaria Estrutural séc. XX

A alvenaria estrutural apesar do seu fulgor expressivo, foi relegada para segundo plano. Com efeito, vários foram os fatores que terão contribuído para este desiderato, desde o encarecimento da mão-de-obra, ao aparecimento do betão armado mas, fundamentalmente, tal ocorreu em função dos princípios disruptivos do Movimento Moderno. A Masion Jaoul, projetada em 1956 por Le Corbusier comprova isso mesmo.

O material apresenta uma dimensão que ultrapassa as suas propriedades tectónicas e estruturais, e encerra em si uma dimensão simbólica, capaz de transportar significado e a memória no sentido ontológico, Heideggeriano, de Sorge - Cura, cuidado e, Verfallen - defluxus, decaimento ou dispersão (ver, por todos, Heidegger; Sein und Zeit; O Ser e o Tempo)³¹.

Apesar desta técnica poder ser utilizada, para a realização de edifícios de caráter modernista, o seu vínculo ancestral, comprometia o desígnio inovador e a rejeição cultural ao passado que o modernismo perseguia.

Esta peça arquitetónica apesar da sua boa resposta aos objetivos de projeto, não teve, contudo, a adesão dos projetistas que deram corpo a este movimento, constituindo-se como um caso excecional.

Por contraponto a esta lógica, a prática simbólica do trabalho de Eladio Dieste apresenta um conjunto de curiosidades que interessa sobre maneira analisar e verter no paradigma operativo que, ora, se pretende construir.

³¹ Heidegger, Martin 2009 – Ser e o tempo, Editora Vozes, brasil



Figura 7.2 – Masion Jaoul, 1956, Le Corbusier
 (“Masion Jaoul”, 2016)

Ele funda as suas opções projetuais numa tectónica contextual, isto é, a escolha dos materiais é feita em função dos recursos, do contexto e do Know-how existente, deste modo assegurando a viabilidade do projeto em termos de execução e dos fatores económicos.

Dieste decidiu capitalizar a disponibilidade e a acessibilidade de um material local bem conhecido, ao tomar o tijolo como o seu meio de expressão, tendo demonstrado os recursos e potencialidades intrínsecas a este material. O uso do tijolo não só fez sentido para ele, como também permitiu que os seus projetos se inserissem dentro de uma longa tradição de construção de adobe na América Latina, expressando deste modo uma ligação à sua cultura.



Figura 7.3 – Cobertura da Igreja San Pedro, Durazo, Urugai, 1969, Eladio Diest (esq)
Fábrica Domingo Massaro, Canelones, Urugai, 1969 Eladio Diest (dir)
 (“Material Tour de Force: The work of Eladio Dieste”, 2012)

Para ele, a estrutura, a geometria e o material eram todos componentes de um todo inter-relacionado, sendo a forma um processo de síntese. Cria assim soluções estruturais sofisticadas a partir de um material humilde e tradicional. É a partir desta tectónica que faz emergir uma realidade material e construtiva específicas, ao criar a sua própria narrativa arquitetónica, através da qual contesta os princípios disruptivos e a estética do movimento moderno.

Foi também uma decisão alinhada aos ideais de um grupo de intelectuais e artistas uruguaios, cuja figura mais representativa foi o pintor e escultor Joaquín Torres García (1874-1949), amigo íntimo de Dieste e fundador do movimento construtivista universal, cujo principal contributo doutrinário foi o de advogar a criação de uma linguagem moderna e original própria da América Latina que abarcasse todas as artes criativas.

Julian Palacio, após uma análise *in loco* da obra de Dieste, considera-a como “*um legado com relevância contemporânea, uma prática contextualizada e eficiente, pautada pela invenção e elegância*”: (Palacio, 2012)

“Expliquei, e apoiei com evidência, a preocupação com a racionalidade na construção e economia compreendida, ousei dizer, um sentido cósmico em vez de um sentido financeiro. No entanto, esta não é a coisa toda que me guiou. Eu fui guiado por uma percepção aguda e quase dolorosa da forma”.(Dieste,n.d.)³²

A sua forte ligação à obra garante-lhe um domínio impar do processo, o qual associado a um carácter inventivo lhe permitiu criar soluções técnicas próprias. Eladio Dieste projetou uma série de máquinas que permitiram a realização de um conjunto de estruturas inovadoras, incluindo entre outros, gatos hidráulicos, sistemas motorizados para elevação de cofragens e abóbadas de tijolo.

Dieste desenvolveu um método de pré-esforço, através de cabos laçados na coroa das abóbadas, e ancorados às extremidades da abóbada por ligações soldadas em aço. Entre estes limites, as laçadas são livres de se mover, sendo o pré-esforço produzido

³²Loc. Cit.

através do repuxar das laçadas em forma de oito. Por sua vez, é o controlo da dimensão das laçadas que produz a tração a qual em torno gera o pré-esforço nas abóbadas.

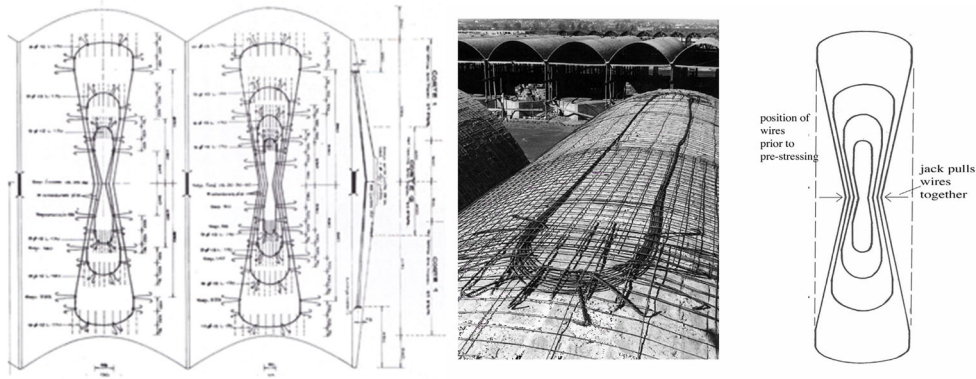


Figura 7.4 – Caracterização construtiva do processo de pré-esforço utilizado por Eladio Dieste.
(Pedreschi Remo, “The Engineer’s Contribution to Contemporary Architecture”, 2000)

A inventividade de Dieste procurava fazer face às necessidades que iam decorrendo do ciclo construtivo, assim, concebeu um macaco simples sem sistema hidráulico, que através de uma rosca sem fim conseguia puxar os cabos em simultâneo.

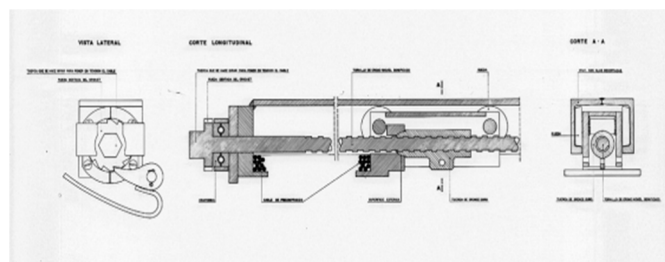


Figura 7.5 – Macaco de pré-esforço concebido por Eladio Dieste
(“The Engineer’s Contribution to Contemporary Architecture”, 2000:43)

7.4 Alvenaria Estrutural Contemporânea - Abóbadas do Séc. XXI

O atual interesse pelas abóbadas de alvenaria estrutural decorre do trabalho seminal feito pelo grupo de pesquisa de alvenaria resistente, do Instituto de Tecnologia

de Massachusetts (Masonry Research Group - MIT), liderado pelo professor John Ochsendorf ³³.

O sucesso do MIT Masonry Research Group, em grande parte foi devido ao desenvolvimento de novas ferramentas digitais que auxiliam a abordagem a este universo tectónico e formal. Estas ferramentas permitiram criar um processo de trabalho, através do qual é possível estabelecer uma relação interativa entre a conceção formal e a análise estrutural.³⁴

A pesquisa iniciada pelo MIT, foi disseminada, pelos seus antigos alunos, através dos trabalhos desenvolvidos em diferentes instituições, sendo disso exemplo, Michael Ramage na Universidade de Cambridge e Philippe Block no Block Research Group (BRG) na ETH em Zurique.

As inovações decorrentes do trabalho realizado pelo BRG permitiram otimizar e resgatar as técnicas milenares de construção de abóbadas cerâmicas. Estes objetos arquitetónicos foram, contudo, suportadas por processos computacionais de análise e conceção.

Um aspeto curioso desta abordagem é a miscigenação de técnicas tradicionais baseados em materiais tradicionais (low-tech) com ferramentas digitais de conceção e análise (high-tech); pode dizer-se que se trata de uma metodologia inovadora apesar de usar materiais tradicionais.

Os processos digitais encontraram na tectónica vernacular a mais eficiente expressão construtiva para a materialização das formas concebidas (curvas e contracurvas) o que

³³ Cf. Masonry Research Group at the Massachusetts Institute of Technology. Accessed 7 December 2015 <<http://web.mit.edu/masonry/>>

³⁴ Cf. Block, P. (2005). "Equilibrium Systems: Studies in Masonry Structure". M.Sc. in Architecture Studies Thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology; Lau, W. (2006). *Equilibrium Analysis of Masonry Domes*. M.Sc. in Building Technology Thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology; Block, P., Ciblac, T., Ochsendorf, J. (2006). Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. *Computers and structures*, 84: 1841-1852; Block, P. (2009). *Thrust Network Analysis: Exploring Three-dimensional Equilibrium*. PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

claramente torna estas técnicas extremamente contemporâneas, ao contrário do que pseudo arautos da modernidade nos pretendem fazer crer.

A sua contextualização tectónica, implicou a adoção de materiais locais, reduzindo os custos, o que tornou esta técnica especialmente atrativa para contextos com menos recursos económicos.

No campo tecnológico, não se pode considerar que a inovação se restringe à utilização de novos materiais, esta é uma visão limitada. Já o revisitar de materiais tradicionais através de novos processos, contextos ou fins pode, sim, constituir-se como uma fonte de inovação.

O caso presente revela assim constituir uma abordagem consciente e livre de preconceitos, que utiliza os recursos disponíveis, em função das suas potencialidades e não em função de opção ideológicas.

O processo de construção em causa baseia-se numa sequência de assentamento na qual os ladrilhos cerâmicos são dispostos de modo a gerar compressão na superfície e assim, garantir a estabilidade da colocação das peças.

A construção destas formas depende de uma gestão do funcionamento estrutural tridimensional, para que a construção seja efetuada ela é sequenciada em seções estáveis.



Figura 7.6 – Abóbada em alvenaria, Zurique, 2011, BRG, ETH
(“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

O trabalho experimental produzido pela ETH – Zurique foi indutor de outras experiências e trabalhos, na área da conceção e construção das superfícies curvas e de dupla curvatura, recorrendo para tal à utilização da técnica de construção das

abóbadas catalãs. Deste modo, usando o sistema RhinoVAULT, o trabalho produzido gerou um novo paradigma de conceção e análise.

Com efeito, no estágio tecnológico em apreço tornava-se evidente que os ciclos conceção/análise/construção apresentam estádios de desenvolvimento destintos, sendo evidente que as soluções e sistemas construtivos, não eram capazes de acompanhar os processos de conceção e de análise.

Na realidade, antes do advento do RhinoVAULT, construções de abóbada geometricamente complexas eram literalmente impossíveis de serem consideradas ou testadas.

Não deixará assim de perceber-se a relevância de ter sido uma técnica construtiva tida como ancestral, que teve a capacidade de dar expressão construtiva, ao fulgor criativo e formal de uma peça gerada por meios e ferramentas digitais de última geração.

Os trabalhos realizados na Austrália *Workshop* na UTS – *University of Technology Sydney*, 2012, Sydney e MADA – *Monash University Art Design & Architecture*, 2013, Melbourne, revelam-se por conseguinte de grande importância, pois funcionaram como laboratórios para testar um conjunto de inovações, que visam dar resposta aos constrangimentos decorrentes da utilização desta tecnologia.

A investigação realizada nesta oficina de trabalho conjugou um método pedagógico inovador, com processos digitais e analógicos na conceção e construção de formas curvas em alvenaria cerâmica.

O processo de trabalho foi capaz de integrar a conceção, a construção e o material, tendo-se revelado uma oportunidade para os alunos, ampliarem os conhecimentos no campo do funcionamento estrutural da forma e do material.

Esta metodologia em que o processo ideativo é contextualizado tecnologicamente, constitui-se uma aprendizagem relevante não só enquanto alunos, mas sobretudo, uma valiosa e relevante metodologia para a sua futura prática profissional como arquitetos.

O ato ideativo é diretamente traduzido em componentes do objeto arquitetónico, conferindo, a este, consistência do ponto de vista conceptual e construtivo.

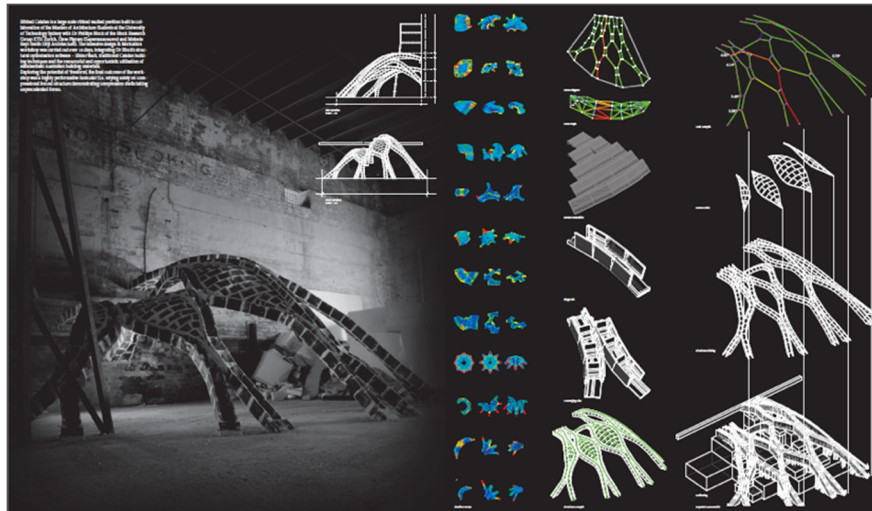


Figura 7.7 – Painel de apresentação, workshop realizado Universidade de Tecnologia de Sidney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich
(Block Research Group, n.d.)

A adequação metodológica deste processo de trabalho é capaz de aglutinar a conceção e a construção, tendo revelado muito potencial, quer na perspetiva educacional quer de uma prática profissional consistente.

As soluções com níveis de rendibilidade maior, menos artesanais e mais industrializadas, recorrem à produção em série e à pré-fabricação, pelo que têm dificuldade em responder à personalização da forma e às exigências construtivas das superfícies curvas.



Figura 7.8 – Configuração das nervuras da superfície, realizado Universidade de Tecnologia de Sidney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich
(Block Research Group, n.d.)

O desenho da secção transversal – perfil, foi objeto de um estudo apurado, para tal foram desenvolvidas várias hipóteses.

PROTOTYPING



TYPE 1: V - PROFILE



TYPE 2: U - PROFILE



Figura 7.9 – Conceção dos perfis das nervuras, realizado Universidade de Tecnologia de Sydney - UTS, 2012, Block Research Group, ETH Zurich
(Block Research Group, n.d.)

O perfil das nervuras foi ainda testado, do ponto de vista do seu funcionamento estrutural e da sua exequibilidade construtiva. Foram por isso, desenvolvidos vários perfis, tendo sido escolhido para a construção do protótipo o perfil em “U”, pela sua adequação e desempenho.

Dado a sua maior profundidade, a forma em “U” aumenta o braço do perfil, aumentando assim o momento equilibrante. Os Canais “U” (cfr, Fig. 7.9) contêm assim a linha de ação estrutural da superfície, ou seja o “caminhar da força”.

Os trabalhos experimentais produzidos pelo coletivo catalão Map13 – Brick topia, bem como o BRG (*Block Research Group*) – SUDU, (*Sustainable Urban Dwelling Unit*), revelam-se de grande importância, pois funcionaram como laboratórios para testar um conjunto de inovações, que visam dar resposta aos constrangimentos decorrentes da utilização desta tecnologia, pelo que estes projetos constituem-se com os casos de estudo que agora elencamos.

7.4.1 Brick-topia, Map13



Figura 7.10 – Brick-topia, fábrica Fabra i Coats, Sant Andreu, Barcelona, 2013, Map13
("Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*", 2016)

7.4.1.1 Estado de arte

O projeto "Brick-topia", foi realizado em Barcelona, pelo coletivo de arquitetos Map13; a sua escala, o tempo de construção e do orçamento, colocaram novos desafios projetistas das abóbadas contemporâneas. O modo como as resolveram, coloca em evidência a necessidade de articular as diferentes ferramentas digitais de projeto, com o ciclo construtivo, de modo a gerar a fluxo de trabalho integrado.

A experiência e as conclusões inferidas da conceção e construção deste objeto arquitetónico, contribuíram para o desenho do paradigma operativo proposto.

A gestão da construção de uma superfície curva com "acabamento aparente" é especialmente difícil mas, quando a isto se junta a falta de mão-de-obra experimentada, na prática torna-se impossível a realização deste tipo de trabalhos. No caso presente, a

mão-de-obra não foi um problema, pois existia uma tradição construtiva local, que viabilizou esta realização.

Ao contrário dos workshops realizados na ETH – Zurique e no UTS – Sydney, em que a funcionalidade não era o foco e o espaço gerado era residual, o principal desígnio do trabalho realizado, era romper com o carácter objetual das peças produzidas até aí – sem escala humana e sem função arquitetónica.

A alteração de escala implicou a complexificação do controlo geométrico durante a construção, tendo ainda o funcionamento estrutural sido levado aos limites. Fruto do aumento do vão, foi então possível a definição de um espaço habitável.

7.4.1.2 Processo de conceção

Para a sua concessão formal foi utilizado o *plug-in* (RhinoVAULTS), também utilizado pelo BRG – Zurique, o qual permite a manipulação da forma de um modo integrado através da análise e compreensão do funcionamento estrutural. Já para a análise do comportamento estrutural recorreu-se a um estudo feito através de elementos de elementos finitos – FEM.



Figura 7.11 – Pavilhão Brick-topia, diagramas de força produzidos pelo software RhinoVAULT
 (“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

Esta ferramenta desempenha um papel chave nesta metodologia, sem o qual não seria possível a realização destas abóbadas. O *software* permite uma análise em tempo real, sendo assim, possível beneficiar desta informação para modelar a forma.

A conceção desta abóbada teve de contemplar, para além das questões estruturais e construtivas, a definição espacial da forma. Por sua vez, a relação funcional entre os espaços é consequência direta das aberturas e das variações altimétricas, resultando deste modo num espectro altimétrico muito variado, com diferentes curvaturas não planificáveis – superfícies parabólicas e hiperboloides.

As ferramentas de modelação digital permitiram uma antecipação do processo de construção, antevendo o ciclo construtivo, o que possibilitou por sua vez o ajuste do processo de construção.

Como resulta óbvio, a representação e consequentemente a construção destas superfícies resultaria extremamente difícil com outro tipo de ferramenta de análise.



Figura 7.12 – Brick-topia, espaços interiores
(“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

7.4.1.3 Técnica construtiva

A reformulação do processo de construção passou pela redefinição dos processos de suporte e referenciação da abóbada durante a sua construção. A nova abordagem recorreu à utilização de andaimes, placas de cartão e barras finas de aço, como elementos de suporte e de referenciação para a construção da superfície.

Os andaimes foram colocados de modo a articularem-se com as dimensões das paletes de madeira, permitindo assim, reduzir a quantidade de cartão utilizado e aumentando o conforto do trabalho realizado.

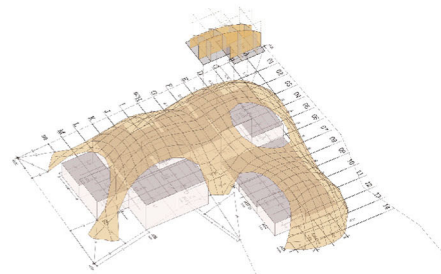


Figura 7.13 – Brick-topia, fábrica Fabra i Coats, Sant Andreu, Barcelona, 2013, Map13
 (“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

Sobre os andaimes de suporte, foi colocada uma reticula de 2 por 2 metros, formada por placas de cartão, cordadas de modo a reproduzir o intradorso da abóboda.



Figura 7.14 – Brick-topia, infraestrutura de construção, Barcelona, 2013, Map13
 (“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

Os topos das placas de cartão que definem os perfis transversais da forma, foram recobertos por barras de aço, as quais se entrecruzam, sendo ajustadas e fixas por arames *in situ*. Uma vez estabilizada esta malha, a reticula de cartão é retirada, permitindo assim que os operários possam construir a abóbada com toda a mobilidade (López et al., 2014:35).

A malha é construída recorrendo a uma tecnologia simples, que permite não só uma economia de meios, mas também facilita grandemente o trabalho dos operários, dado que permite um acesso à superfície quer pelo intradorso quer pelo extradorso.

Todo este procedimento permite a inspeção das juntas, bem como uma adequada selagem melhorando o seu espeto estético e o desempenho estrutural, facilitando e otimizando o processo de trabalho.



Figura 7.15 – Brick-topia, primeira camada de tijolos

(“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

A primeira camada que tradicionalmente apresentava uma espessura de 15 mm foi constituída por tijolos perfurados com DIM: 280x140x40 mm e pesa 1.5 Kg.

Já na segunda camada, houve o cuidado de dar uma direção diferente aos ladrilhos aplicados visando aumentar o travamento da superfície, com o objetivo de a estabilizar e melhorar o seu desempenho estrutural, deste modo aumentando a sua rigidez.

A terceira e última camada não foi aplicada em toda a superfície, restringindo-se a sua aplicação à abóbada de maior vão. Em toda a superfície foram aplicados cerca de 4100 tijolos, tendo sido aplicados na terceira camada cerca 1400 tijolos.

Para a primeira camada, como ligante utilizado para a construção, foi utilizada uma argamassa de cimento rápido e aglutinante, o chamado “cimento natural rápido” (consistindo em gesso com cimento) devido à brevidade com que se atinge a respetiva presagem, o que permitiu uma estabilização célere dos ladrilhos.

Com as temperaturas médias acima de 30°, foi necessário utilizar cubos de gelo na preparação da argamassa, retardando assim a secagem, tendo sido ainda adicionado retardador na argamassa. (Lopez et al, 2014:34)

Da primeira para a segunda camada foi aplicada uma fina película de argamassa, unindo e servindo de transição às duas fiadas. A escolha da argamassa teve em atenção a rapidez de fixação, que solução apresentava.

Para a segunda camada utilizou-se um traço de cimento rápido com areia fina e lavada (1:1). Esta argamassa é mais difícil de trabalhar, dado ter um tempo de secagem menor do que uma argamassa à base de cimento Portland.

A terceira camada foi aplicada utilizando novamente cimento Portland pré-doseado com um acelerador de presa.



Figura 7.16 – Brick-topia, aplicação das várias camadas de tijolos
(“Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*”, 2016)

As juntas utilizadas na construção da abóbada, variam na sua dimensão entre 5 mm e 10 mm, consoante a aplicação entre fiadas ou entre camadas.

A casca de alvenaria começou a funcionar estruturalmente em toda a plenitude a partir da aplicação da segunda camada, pois a infraestrutura utilizada para a construção apenas suportava a carga da primeira camada e alguma carga pontual resultante dos trabalhos de construção.

A segunda camada já conseguiu suportar todas as necessidades de construção da abóbada, ferramentas, pessoal e material de construção.

O aspeto mais determinante da construção desta abóbada foi a sua cofragem, não só por ser uma infraestrutura determinante no processo de construção, mas também por consumir tempo e dinheiro na sua construção.

Este é um dos aspetos mais determinantes no processo de construção das superfícies curva, sendo um desafio para os arquitetos e engenheiros, encontrar soluções mais rápidas, versáteis, eficientes e económicas.

Em última análise, e antecipando, o objetivo da presente dissertação, temos a eventual concepção de procedimentos, metodologias e recursos materiais que permitam, inclusive, eliminar em alguns casos, a utilização de cavaletes, cofragens ou cimbramentos

O trabalho realizado no Brick-topia, permitiu apesar disso inovar e testar um conjunto de novas soluções à escala real.

7.4.1.4 Funcionamento estrutural

O RhinoVaults permitiu manipular o peso próprio da forma, para gerar uma superfície a funcionar tridimensionalmente à compressão. Para a sua análise da forma estrutural, foi utilizado o método de elementos finitos

O modelo de análise resultou de uma configuração na qual se utilizou cargas uniformes e de cargas de 1 kN, no sentido de simular as situações mais desfavoráveis.

As soluções construtivas adotadas no Brick-topia, apesar de não serem submetidas a testes experimentais, utilizaram como referência os valores da tese do arquiteto David Lopez.

A solução referenciada na tese utilizava tijolos ocos para as diferentes camadas e gesso com ligante. A abóbada Brick-topia utilizou tijolos maciços (primeira e terceira camada) e uma argamassa de assentamento de base cimentícia de secagem rápida,

A solução construtiva encontrada para a "Brick-topia" teria forçosamente um comportamento melhor, sabendo que o cimento de fixação rápida tinha uma maior

resistência, garantida pelo fabricante. Partindo do pressuposto, que os tijolos sólidos oferecem melhor resistência e (que o seu maior peso próprio não afeta o funcionamento estrutural da forma) a tensão de compressão produzida ao longo da forma ficaria longe de atingir os níveis de resistência à compressão.

Uma peça arquitetónica que só produza compressões no seu funcionamento, apresenta tensões baixas e, logo, a adição de peso próprio resulta em algo positivo para a estabilidade da forma perante possíveis cargas pontuais ou assimétricas, uma vez que permite a sua recondução em função do eixo longitudinal da peça arquitetónica.

A solução adotada para a "Brick-topia" apresenta um acréscimo de segurança em relação às soluções estudadas previamente na dissertação de David Lopez.

A análise realizada confirma, que enquanto a resistência à compressão adotada foi de 5.9 N/mm², as tensões de compressão nem chegaram a 2N/mm² (Fig. 3.18).

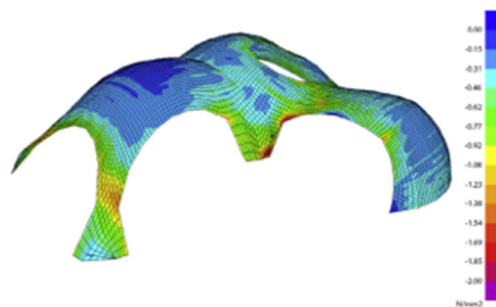


Figura 7.17 – Brick-topia, primeira camada de tijolos
 ("Tile vaulting in the 21st century *La bóveda tabicada en el siglo XXI*", 2016)

A exploração estrutural do modelo, no qual foram aplicadas diferentes combinações de carga, permitiu constatar que a forma não funcionava exclusivamente à compressão, produzindo também tensões de tração. Para obviar a este fenómeno foi aumentada a espessura da abóbada a fim de encaixar o caminhar da força.

Como se compreende, o aumento do peso próprio também altera a linha de impulso da força, a correta manipulação formal permite utilizar esse peso próprio de modo a recentra-la no eixo da peça e contendo-a na secção transversal, deste modo evitando a produção do momento externo aplicado (as variações de espessura e do respetivo peso próprio acabam por funcionar como, como que uma espécie de pré-esforço).

A tração produzida pela forma foi o fator chave para o funcionamento estrutural da forma e para a determinação das diferentes espessuras da forma.

A análise feita apontava para uma espessura de 65 mm, isto é, duas camadas de tijolos, o que revela um cenário em que nem todas as abóbadas apresentam tensões de tração admissíveis. A solução encontrada foi aumentar a espessura para 118 mm, o que equivale a três camadas de tijolos, alteração que foi o suficiente para atingir valores de tração aceitáveis, na ordem 0,13 N/mm². (López et al., 2014: 37)

A terceira camada foi aplicada na abóbada com maior vão, destinando-se esta camada a estabilizar a forma e evitar potenciais desequilíbrios decorrentes de cargas pontuais.

A forma estrutural foi projetada para funcionar primordialmente à compressão, pelo que as trações existentes são consequentemente baixas. Aquela teve de ser alterada já em fase de obra, devido a constrangimentos do projeto, tendo sido necessário efetuar uma redução da dimensão formal a construir.

Toda a experiência de construção já adquirida na execução do protótipo e o estudo do funcionamento estrutural das abóbadas catalãs, permitiu uma fácil reconfiguração do projeto *in situ*.

Para fazer a alteração recorreu-se a uma verga de aço de 6 mm, tendo assim sido encontrada rapidamente, a nova forma, capaz de produzir apenas compressão, de um modo expedito e de baixo índice tecnológico.

7.4.2 SUDU unidade habitacional sustentável, Etiópia, 2010, Block Research Group



Figura 7.18 – SUDU unidade habitacional sustentável, Etiópia, 2011, Block Research Group
(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

7.4.2.1 Estado de arte

Philippe Block, Lara Davis e Dirk Hebel³⁵, assumiram uma perspectiva de escassez económica e de recursos naturais, para a construção do SUDU (Sustainable Urban Dwelling Unit).

A falta de grandes quantidades de madeira ou de aço implica a utilização de tipologias estruturais de grande eficiência, que exigiam poucos recursos, podendo ser executados com materiais de baixo índice tecnológico, como são, os blocos de terra compactada.

O projeto revela o seu desígnio metodológico de articular o universo extenso e diverso de princípios e dimensões, que a arquitetura abarca, mas que raramente são abordados em simultâneo e de modo tão interligado. Assim, o projeto articulou aspetos extremamente díspares, desde as dimensões, espaciais, funcionais, tectónicas, e económicas, englobando inclusive outras mais ideológicas, como as sociais, sociológicas e, inclusive, ambientais.

A metodologia revela-se o aspeto mais relevante do trabalho desenvolvido, pois foi graças à sua consistência, que foi possível alcançar uma solução sólida e capaz de sintetizar, programa, tecnologia, ideologia e plasticidade.

O foco de interesse neste trabalho é estudar a metodologia utilizada, os seus processos, bem como os diferentes níveis de articulação e interligações entre princípios eleitos para o projeto, visando validar cientificamente os princípios estruturantes no projeto.

A metodologia desenvolvida para a realização deste projeto, incluiu ainda no seu processo operativo, uma forte dimensão ideológica, expressa pelas preocupações sociais e ambientais e que o projeto revela, bem como pela forma como é apresentado e comunicado o trabalho feito.

³⁵ Cf. Block, P. et al. (2010) "Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa", *ATDF Journal (African Technology Development Forum)* 7(1/2): 4-13; Davis, L. and P. Block (2012) "Earthen Masonry Vaulting: Technologies and Transfer", in Cherenet, Z. and H. Sewnet (eds.), *Building Ethiopia: Sustainability and Innovation in Architecture and Design* pp. 219-232. Addis Ababa: Shama Books; Hebel, D.E. et al. (2015) *SUDU: Research and Manual*. Berlin: Ruby Press.

A regeneração social é um tema abordado por muitos arquitetos ao longo dos tempos, os quais acreditavam que a arquitetura era um veículo para conferir dignidade ao Homem e assim alcançar, paz e harmonia social (Charles Fourier). O empenhamento do arquiteto para com a comunidade foi talvez enunciado pela primeira vez por Leon Battista Alberti que afirma que o arquiteto é antes de mais um bom cidadão.

Estes aspetos tornam a metodologia mais rica, mas também mais difícil de avaliar de um modo objetivo, pela impossibilidade de os quantificar de modo eficaz.



Figura 7.19 – SUDU unidade habitacional sustentável, Etiópia, 2011, Block Research Group
("Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design", 2011)

7.4.2.2 Processo de conceção

O processo de conceção do SUDU foi capaz de acolher as exigências programáticas, do desenho urbano, do ciclo de construção, da replicabilidade do módulo projetado, bem como os princípios que os seus autores veiculavam.

As ferramentas e meios digitais são a base operacional da metodologia, dando expressão ao programa e aos princípios de projeto. Estas ferramentas justificam o sucesso da realização da peça, permitindo a modelação e análise das superfícies curvas.

As vantagens evidentes das formas curvas esbaravam com questões culturais e sociologias. Os valores aspiracionais da população procuram uma imagem "mais contemporânea" e "mais evoluída". O bem-estar e o conforto económico são associados a uma imagem mais ocidental da arquitetura, o chamado Movimento Moderno.

Este fenómeno de aculturação privilegia as linhas retas, rejeitando as linhas curvas, pelo que houve a necessidade de ajustar a imagética da arquitetura aos anseios da população.



Figura 7.20 – Exterior SUDU, unidade habitacional sustentável

(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

A peça arquitetónica não tira exteriormente partido da curva com expressão formal. A geometria é deliberadamente escondida no exterior, gerando a imagem ambicionada pelos habitantes.

Em contraponto o interior é pautado por superfícies curvas e a subtileza da curva é explorada para gerar os espaços que compõem a habitação, sendo aí curiosamente bem acolhida pelos utilizadores.

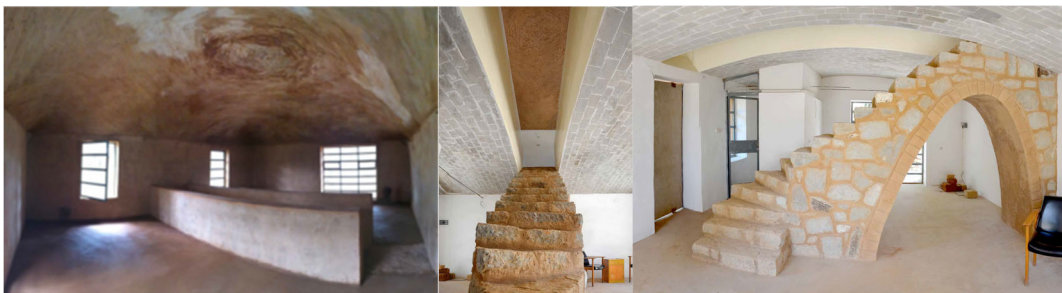


Figura 7.21 – Interior SUDU, unidade habitacional sustentável

(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

A falta de meios e de recursos económicos, pautaram não só as opções construtivas e estéticas da arquitetura produzida, como os acabamentos das superfícies expressam esta coerência e resultam da expressão dos materiais utilizados. Como pode perceber-se das imagens, infra, os acabamentos aparentes sublinham o material e a sua potencialidade plástica

A estes critérios objetivos, juntam-se critérios de carácter subjetivo, que expressam um posicionamento ideológico dos projetistas. A construção foi feita sem a utilização de materiais tóxicos, privilegiando materiais com um baixo índice de tecnologia, neste caso produzidos com recursos locais.

Os impactos ambientais foram minimizados escolhendo matérias com baixo índice de energia incorporada. O carbono e as redes de carbono libertado na produção dos materiais, foram igualmente foco de atenção dando-se especial enfoque ao modo como os materiais são utilizados através do cruzamento das suas limitações com os princípios ideológicos e de tecnologia mais avançada.

A importância destas ferramentas não é exacerbada, não se encarando as ferramentas e meios digitais como a solução para todas as tarefas que a prática da arquitetura possa encerrar. Com efeito, os meios são articulados em função das potencialidades, não existindo o desígnio, ainda que encapotado, de “digitalizar” todas as fases, o que seria negativo para o resultado final.

7.4.2.3 Técnica construtiva

A técnica adotada foi determinante para a viabilização o projeto, permitindo dar expressão material às formas concebidas pelas ferramentas digitais e que dificilmente seriam possíveis de implementar através de outras técnicas mais recentes.

As primeiras fiadas dos edifícios são feitas com pedra vulcânica, tirando partido dos recursos locais, o que permite impermeabilizar a construção e as restantes fiadas foram construídas com blocos de terra estabilizados, produzidos também localmente (Block et al., 2010).

Os pavimentos são inspirados nas abóbadas catalãs, que não obstante a antiguidade da técnica de construção, esta não era dominada pela mão de obra local. Tal dificultou

em muito a realização do projeto, tendo este obstáculo sido contornado pelos seus gestores do projeto através de cursos de formação para capacitar os operários locais para estas tarefas.



Figura 7.22 – Abóbadas de berço SUDU, unidade habitacional sustentável
 (“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

Esta realidade coloca em evidência a necessidade de criar sistemas capazes de tornar a construção de superfícies curvas mais simples e rápidas.

7.4.2.4 Funcionamento estrutural

O paradigma estrutural adotado pela equipa de projeto resulta de um contexto tecnológico, económico e material, tendo a solução emergido da geometria da forma, relegando para segundo plano a capacidade de o material resistir à rutura, i.e., de atingir tensão de rutura. Tal prova, que mais importante que o material e a sua resistência mecânica, é a geometria e o equilíbrio gerados pela forma.

Este universo formal é capaz de gerar vãos estáveis com menos material, com materiais mais simples de produzir e mais baratos.

O impulso horizontal foi uma clara preocupação dos projetistas, pois, desenvolveram um conjunto de estratégia para o anularem. Assim as paredes são feitas de taipa, sobre as quais é colocado um anel perimetral feito de vigas de betão, bem como, a utilização de tirantes, que ligam as paredes onde a abóbada descarga.

De acordo com as regras de Ponce, formuladas para certificar a viabilidade de construção sem cofragem, as abóbadas de alvenaria de tijolo resistente, não podem apresentar uma flecha muito pronunciada, é a chamada, abóbada rasa.



Figura 7.23 – Construção dos diafragmas das Abóbadas de berço, SUDU
(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

As estruturas mais rasas, pela horizontalidade da sua geometria, transmitem um maior impulso horizontal, usando menos material na sua formalização, por isso gerando menos peso próprio. Contudo criam a necessidade de utilização de tirantes, que liguem os apoios das abóbadas, limitando deste modo o aparecimento da força de contra-forte.



Figura 7.24 – Tirantes das Abóbadas de berço, SUDU
(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

As estruturas de forma anti funicular funcionam à compressão e geram uma linha de transporte da força, com uma geometria parabólica, o seu *caminho* tem de se inserir dentro da secção transversal, para que a forma esteja em equilíbrio.

Uma forte carga assimétrica, por exemplo, um grupo de pessoas posicionadas num dos lados da abóbada, altera a configuração da linha de impulso da força, podendo gerar desequilíbrios no sistema estrutural.

A colocação de diafragmas não só aumenta a rigidez da abóbada como também permite o seu preenchimento, conformando o pavimento desse piso. Este aumento da massa volúmica, verticaliza a sua linha de impulso, minimizando o impulso horizontal gerado pela abóbada.

A utilização diafragmas e de tirantes ligados aos apoios alteram o caminho da força, limitando ou anulando o impulso horizontal, tornando assim a forma estrutural mais estável.

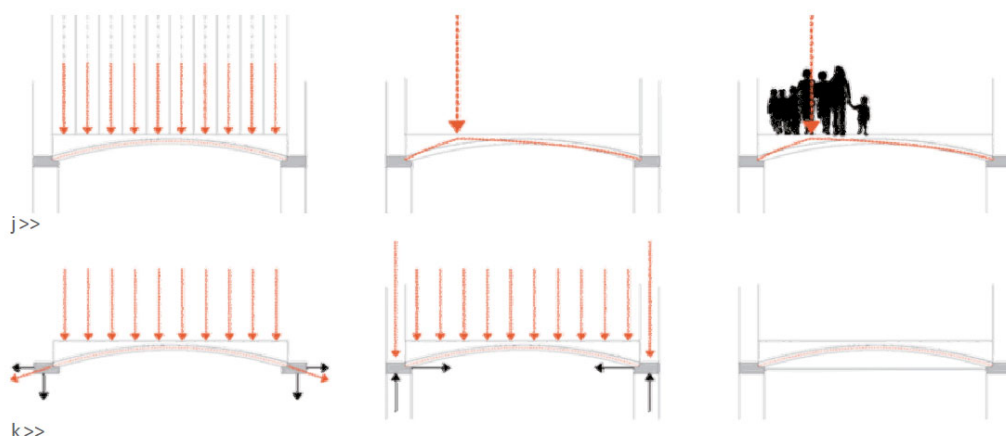


Figura 7.25 – Funcionamento estrutural da abóbada de berço

(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2011)

Os diafragmas são componentes estruturais que otimizam o funcionamento estrutural (passe o pleonismo) das abóbadas de berço, pois estas têm a vantagem de apresentar uma só curvatura, simplificando a sua descrição geométrica e a sua construção.

Capítulo 8 - Paradigma operativo para a utilização de meios digitais na conceção e construção de superfícies curvas

8.1 Preâmbulo

Immanuel Kant terá afirmado que a arquitetura é a arte de criar sistemas. Não obstante da origem ilustre de tal afirmação, a presença de um sistema ordenador é o que garante, entre outros atributos, a consistência conceptual do artefacto arquitetónico.

E ainda que a presença de sistematicidade no processo ideativo da arquitetura não lhe confira uma especial configuração espacial ou formal, aquela, pela sua própria natureza, constitui-se por isso mesmo, simultaneamente, num atributo essencial, necessariamente estruturante desta, bem como num dos seus mais relevantes corolários.

Com efeito, a complexidade e abrangência dos processos envolvidos na conceptualização arquitetónica, a que haverá a juntar um conjunto de ferramentas e meios, quer físicos quer digitais, poderia facilmente introduzir em função da adução de tais poderosos recursos, uma carga potencial para a dispersão e a perda de foco relativamente aos desígnios de projeto.

Daí que, como facilmente se poderá talvez depreender, a partir de uma certa dimensão e nível de complexidade, torna-se muito difícil atingir uma adequada solidez conceptual, sem a presença de uma metodologia. E esta não deve ser impositiva ou limitadora, antes terá de ser ordenadora, abrangente e flexível, para deste modo ser possível permitir que a criatividade inerente ao pensador e intérprete do projeto, opere com arbítrio, ponderação, consistência, intencionalidade e adequação à finalidade projetual, pretendida.

O procedimento sistemático permite, contudo resolver vários problemas, decorrentes da prática de projeto, reduzindo deste modo a margem de arbitrariedade e imponderabilidade das decisões, respeitantes à referida prática de projeto.

Assim, a definição de rotinas para os diferentes ciclos de projeto, estabelecendo critérios e objetivos, bem como a definição de um ciclo de interação das diferentes ferramentas

e meios diferentes digitais, irá conferir à prática de projeto os necessários princípios ordenadores que conferirão solidez ao artefacto arquitetónico, a projetar.

Os arquitetos por natureza apresentam alguma resistência à adoção de metodologias conceptuais, sendo que uma das razões resultará eventualmente do medo que a sua utilização tolha a sua criatividade e conduza a resultados tendencialmente iguais. Contudo da triangulação entre o método, a definição programática e as situações contextuais concretas resultarão necessariamente sempre obras singulares, pois estes parâmetros jamais apresentarão valores idênticos, ainda que possam ser semelhantes ou equivalentes.

Cada projeto é como um jogo de variáveis entre si, com regras (tendencialmente, mas nem sempre) bem definidas, estas regulam as relações entre as diferentes partes e entre o artefacto e o seu meio. Estas permissas, ou pelo menos vários dos seus aspetos, nunca são definidas totalmente a priori e tornam-se muitas vezes mais claras quando o final do processo se aproxima, momento em que podem ser finalmente perceber como uma função estrutural, formal e global.

O paradigma operativo pela sua flexibilidade permite deste modo acolher as diferentes narrativas espaciais, conferindo uma maior consciência aos desígnios dos projetos e às soluções encontradas.

A problemática colocada pela aplicação das tecnologias digitais na prática da arquitetura é um fenómeno recente, datando dos anos 60, tendo delas resultado, contudo, um profundo impacto no exercício do projeto de arquitetura.

Branko Kolarevic, na sua obra *“Architecture in the Digital Age”* (2003) analisou e descreveu as consequências dos meios e processos digitais na arquitetura. O autor chama a atenção, para as potencialidades da interação das ferramentas digitais, geradas pelo fluxo CAD/CAE/CAM, e que designa por *“contínuo digital”*.

O conceito proposto, no paradigma de personalização em série ou, em inglês, *mass customization*, põe em evidência que a *Construção* e a *Conceção* passam a estar integrados, na prática da arquitetura. (Kolarevic 2003:3)

O paradigma estabelecido por este conceito, une de novo a conceção e a construção, naquilo a que Capro (2011: 32) designou de estado ideal do processo autográfico, na medida em que altera o relacionamento entre o projeto de arquitetura e os meios de produção que a materializam. Segundo Gramazio e Kohler é, pois, possível:

“incorporar no desenho”...aquando do “...momento de conceção, a ideia e o conhecimento da produção. Por sua vez, o entendimento da construção como parte integrante da conceção de arquitetura ganha um maior significado”. (Gramazio and Kohler, 2008:8)

As mudanças que resultam das ferramentas e processos digitais vão, porém, para além de uma simples alteração dos meios ou do suporte que sustenta a prática da arquitetura, já que a interação que se gera entre a conceção e a construção altera o próprio modo de pensar e projetar arquitetura.

Por este motivo, o ciclo definido por conceção, análise e construção, deixa de ser um processo sequencial e diferido no tempo, para passar a ser um processo simultâneo, interativo e que decorre em tempo real.

Esta nova realidade coloca ainda questões no âmbito da representação da arquitetura e da metodologia de projeto.

A comunicação da ideia revela-se determinante na estruturação do processo metodológico de projeto, sendo aqui possível a este nível distinguir dois modelos, o autográfico e o alográfico.

O “*contínuo digital*” rompe com o modelo alográfico de conceção, uma vez que a ideia mental, passe a redundância, é feita, i.e., materializa-se em ambiente digital, não se tratando de uma *representação*, se se quiser, de um símbolo, mas antes de um *modelo* digital, em certo sentido, uma representação holística de um objeto digital criado num universo digital, que se pretenderá que tenha depois existência física . Daí que Gramazio and Kohler refiram, embora sem densificar:

“O termo Digital Materiality é usado para descrever uma transformação emergente na expressão da arquitetura. A materialidade tem vindo a ser enriquecida com características digitais” (Gramazio and Kohler, 2008:7).

Este enriquecimento dá-se, entre outras razões, porque os meios digitais que definem o “*contínuo digital*”, não só colocam em evidência a necessidade de articular as várias

dimensões da arquitetura, como também oferecem processos interativos em tempo-real.

E por isso, as alterações, decorrentes dos meios digitais na articulação do processo conceptual, que concluem na construção digital da ideia conceptual, acarretam um enquadramento mental, distinto de uma conceção suportada por um processo sequencial e temporalmente diferido.

E só deste modo podemos prosseguir para o patamar pretendido por Gramazio, Kohler&Wilmann, quando afirmam que:

“O que esta em curso é um desenvolvimento abrangente em toda a prática da arquitetura: a unificação da conceção e produção que - em conjunto com processos digitais - abre oportunidades totalmente novas para a materialização arquitetónica. (...) e põe em causa as divisões, anteriormente evidentes, entre projeto e construção, informação e mecânica e tecnologia e cultura de edificação”. (Gramazio, Kohler and Wilmann, 2014:103)

Esta realidade operativa emergente exige uma adequação do processo cognitivo e metodológico, que importa refletir, quer na prática profissional, quer no ensino da arquitetura.

O ciclo de projeto suportado pelas ferramentas digitais CAD/CAE/CAM – “*contínuo digital*”, necessita de uma visão holística capaz de articular os vários momentos que constituem o exercício da arquitetura.

O carácter operativo e a transversalidade destes meios faz emergir a necessidade de definir um processo metodológico estruturante, capaz de responder aos desafios colocados pela articulação dos meios digitais.

O processo metodológico utilizado para estas ferramentas deve ser capaz de potenciar as suas virtudes e limitar os possíveis equívocos, que este fluxo operacional pode gerar, quando desprovido de um quadro metodológico sólido. Os meios digitais existentes requerem, antes exigem conceptualmente, um quadro teórico e operacional que suporte e materialize uma prática sólida e consequente do projeto arquitetónico, algo que ainda

não existe, e cuja necessidade é evidente. Veja-se o caso, referido imediatamente infra, de alguns resultados obtidos pela “morfogénese digital”.

A manipulação geométrica que as ferramentas digitais permitem, quando não devidamente contextualizadas e suportadas por uma metodologia de projeto, capaz de abarcar as várias dimensões intrínsecas à arquitetura, resulta em exercícios formais especulativos, expondo a falta de consistência teórica e conceptual, como seja o caso de alguns exercícios formais (morfogénese digital), feitos em ambiente digital no qual o material e a gravidade não são considerados.

Quando a estas premissas se junta um desconhecimento da fenomenologia estrutural (cfr. Cap. III) bem como a falta de uma metodologia ou paradigma operativo, a que o projetista deve atender, para que o objeto arquitetónico cumpra os seus desígnios, os riscos são evidentes.

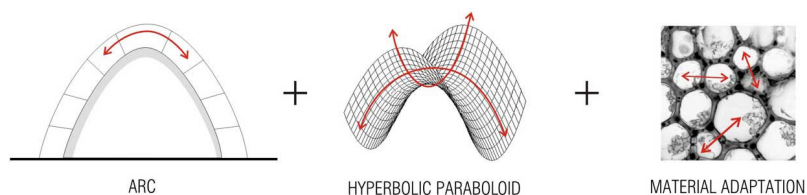


Figura 8.1 – Ideograma do projeto do pavilhão Honey Scape
(festival Internacional de Jardins, 2012)

Para ilustrar esta situação apresenta-se o pavilhão Honey Scape, realizado para o Festival Internacional de Jardins 2012, onde se pode constatar esta problemática, isto apesar de um discurso aparentemente estruturalista, como se comprova pelo ideograma de apresentação e pela fundamentação do projeto feita pelo seu autor.

“Os favos funcionam em parte como as aduelas de um arco parabólico que se suportam mutuamente, adotando uma configuração de uma superfície portante de dupla curvatura (parabolóide hiperbólico), ajustando a sua dimensão à sua posição relativa na estrutura. Como tal, os favos são maiores na base diminuindo de tamanho e altura até ao cimo da estrutura. Para gerar e manufaturar os componentes, recorreu-se ao uso de

programação e de fabrico assistido por computador.” (Festival Internacional de Jardins, 2002)

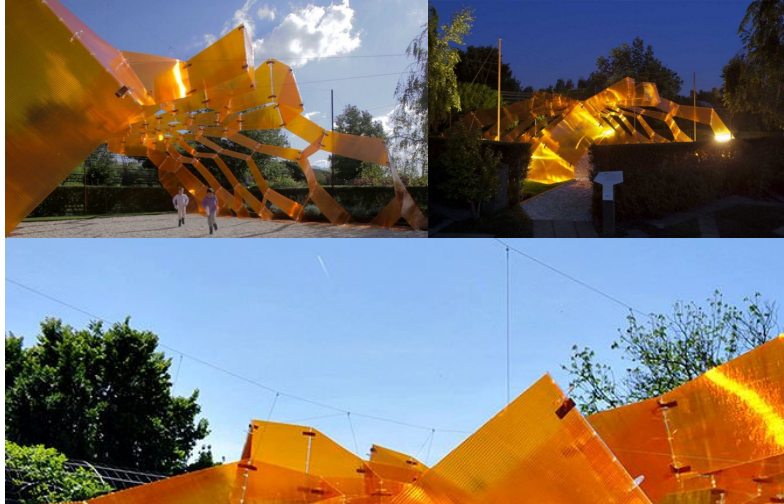


Figura 8.2 – A forma estrutural do pavilhão Honey Scape, é suportado por cabos
(festival Internacional de Jardins, 2012)

O processo criativo deste projeto ignorou a realidade do material e o seu funcionamento estrutural. Como consequência, uma superfície de dupla curvatura (forma estrutural) passou a ser um objeto suspenso por cabos, como se verifica na Fig. 8.2 supra.

Uma manipulação inadequada da geometria da secção transversal da peça produziu fenómenos de encurvadura, decorrentes da compressão, afetando o funcionamento global do objeto. A supracitada gestão do posicionamento das aduelas na estrutura, na verdade revelou-se desajustada e incorreta. E, ao contrário do que é dito, os favos menores deveriam estar na base, pois os maiores níveis de compressão encontram-se aí, potenciando o aparecimento dos momentos de segunda ordem, como as referidas encurvaduras.

A mudança da geometria da secção transversal, ou a alteração da dimensão longitudinal das peças, teria sido suficiente para que a peça adquirisse um outro funcionamento estrutural.

Os processos digitais são ferramentas de grande eficácia e permitem responder não só às necessidades de personalização da arquitetura, como também responder às exigências de representação das geometrias complexas. Porém, sem conhecimento e metodologia tornam-se frágeis conceptualmente, podendo enredar o arquiteto em formalismos insustentáveis na sua implementação material não cumprindo o requisito “*heideggeriano*”³⁶ do Habitar.

O caso aqui apresentado revela o potencial das ferramentas digitais, mas também os seus perigos. É certo que estas ferramentas foram fundamentais para a viabilização do projeto, contudo, e por não atenderem à “materialidade subjacente” apresentam uma utilização desintegrada e parcial do “contínuo digital”, a que acresce a falta de uma metodologia de suporte, que permitiria avaliar eventuais problemas, melhorar as soluções encontrada e facilitar o processo de construção.

No caso do pavilhão Honey Scape foi utilizado a articulação (CAD/CAM) para o desenho e fabricação, podendo constatar-se a falta de observância dos princípios mais básicos do funcionamento estrutural e um processo conceptual débil, o que associado a uma falta de *conhecimento*, conduziu este arquiteto a uma solução que não foi capaz de cumprir os objetivos traçados.

Conclui-se assim que a simples utilização das ferramentas digitais não confere só por si, a excelência dos resultados; é necessário que a sua utilização seja pautada por um enquadramento teórico e operativo, diríamos mesmo estrutural, para que os objetivos de projeto não sejam desvirtuados, nem que os resultados decorrentes da sua utilização apresentem uma inconsistência projetual.

O “*contínuo digital*” de Kolarevic aponta para a possibilidade de interação e articulação dos meios digitais disponíveis, de modelação, análise e fabricação, configurando a possibilidade de gerar um processo que agregue os diferentes ciclos da arquitetura, ao nível da representação e manipulação geométrica, da análise e mesmo de fabricação digital.

Rivka Oxman, William Michel e José Duarte et al, teorizaram as relações entre os utilizadores e os processos. Os esquemas taxonómicos por eles produzidos, apenas

³⁶ Filosofia relativo ao filósofo alemão Martin Heidegger (1889-1976), ou à sua obra.

articulam as ferramentas e meios digitais, com o intuito de estabelecer uma sequência de trabalho, estando contudo longe de refletir as necessidades operativas e teóricas do exercício de projeto.

As possibilidades de interatividade e interligação que as ferramentas digitais oferecem, ajustam-se às necessidades projetuais das superfícies curvas e de dupla curvatura, que pela sua maior complexidade geométrica apresentam uma dificuldade acrescida, na representação, na manipulação formal e na construção.

A metodologia de projeto e os processos de produção utilizados pelo Design há muito que resolveram os desafios que a utilização das superfícies curvas e de dupla curvatura colocam, sendo comum o seu emprego nas indústrias automóvel, aeronáutica e naval (Kieran and Timberlake, 2004:84).

O Design implementou uma visão integrada do processo, eliminando a separação dos intervenientes, o que anula as características nefastas anteriormente referidas, no âmbito do processo conceptual vigente na arquitetura tradicional, que geravam procedimentos segregados e desarticulados, com consideráveis desperdícios de recurso e tempo.

Uma rápida passagem pela história da Arquitetura permite igualmente concluir, que os casos mais bem-sucedidos de superfícies curvas resultam de uma prática de projeto cerceada no processo construtivo, sendo disso exemplo o arquiteto Félix Cadela, o engenheiro Eladio Dieste e o mestre de obras Rafael Gustavino.

As especificidades das superfícies curvas requerem por isso uma metodologia capaz de dar resposta à sua maior complexidade, de um modo sólido e eficaz; esta passa por uma articulação das diferentes etapas de projeto e o modo como antecipam, concebem e planeiam a sua construção.

É necessário ir pra além das abordagens produzidas pelos modelos de aplicação das tecnologias digitais em arquitetura formulados por Rivka Oxman, William Michel e José Duarte et al., uma vez que as suas taxonomias apenas interligam estrategicamente de modo sequenciado as ferramentas e os meios digitais, ao definirem a articulação de um quadro instrumental mas que, até por isso, não formula nem reflete a necessária manipulação dos axiomas operativos necessários para o exercício da prática materializadora da construção arquitetónica.

Um qualquer quadro instrumental de meios digitais, só por si, não garante a obtenção de peças arquitetónicas, capazes de responder aos requisitos da conceção, da análise e da construção da arquitetura, pelo que, parece assim ser necessário aprofundar esse esquema operacional, conferindo-lhe densidade metodológica, através da sua articulação com a teoria de projeto.

Os meios digitais, para uma utilização sólida requerem o desenho de um processo operativo, mais específico e detalhado do que um simples esquema taxonómico. É necessário encontrar um processo capaz de enquadrar e implementar as diferentes valências das ferramentas digitais, através de uma grelha, definida por um conjunto de axiomas operativos, aptos a expressar e sintetizar no projeto de arquitetura, a sua complexa teia de aspetos, que vinculam e interligam, o lugar, a solução programática, o papel da tecnologia, a significação e a memória na arquitetura.

As oportunidades oferecidas pelos meios digitais e a necessidade de desenhar uma grelha operativa, permitem enquadrar os desafios colocados pela conceção e materialização das superfícies curvas.

A partir de uma base, definida por um esquema taxonómico próprio, ajustado às formas curvas, foi desenvolvido um quadro operativo, que articula as ferramentas digitais, em conjunto com axiomas operativos, estruturantes para a conceção e construção de peças arquitetónicas com este universo formal.

O pensamento teórico expresso no *Ensaio da Razão Compositiva* de Edson Mahfuz determinou os axiomas operativos utilizados na grelha, conferindo-lhes uma valência e uma solidez metodológicas na prática de projeto, que os anteriores esquemas taxonómicos não abordavam. Deste modo é possível dotar de um suporte teórico, a utilização dos meios digitais, potenciando o seu emprego e conferindo solidez à prática de projeto, feita com base nestas ferramentas.

Mahfuz realça no seu pensamento a dimensão tecnológica no processo de conceção arquitetónica. Este aspeto confere-lhe um traço de originalidade na produção teórica da arquitetura, mas também uma especial adequação, uma vez que a maioria das abordagens da teoria da arquitetura à metodologia de projeto, restringem o seu âmbito reflexivo, ao processo compositivo e funcional da arquitetura, descurando, ou mesmo ignorando, a dimensão *tecnológica* da arquitetura, a qual em última análise é a que habilita à materialização do projetado.

A abordagem à tecnologia feita por Mahfuz, é genérica, ao nível da tectónica da arquitetura, também não particulariza nem aborda o potencial da faceta digital da tecnologia. O esquema operativo ora proposto, na grelha operativa sequente, colmata esta lacuna, tendo sido possível através da investigação realizada, do estado real da arte e com a caracterização dos estudos de caso, aportar os benefícios e as exigências dos meios digitais.

A pesquisa desenvolvida nestas etapas, permitiu ainda identificar outras dimensões de carácter mais subjetivo, não abordadas deliberadamente por Mahfuz, mas igualmente presentes no exercício da prática arquitetónica, sendo disso exemplo os aspetos sociológicos, os aspetos ideológicos, bem como a *significação* e a *memória* que a peça arquitetónica transporta.

Para além destes aspetos não será certamente irrelevante ainda, a análise e ponderação dos critérios legais no projeto, cuja abordagem, difícil pela sua diversidade e, contudo determinante para a implementação, é frequentemente deixada exclusivamente a terceiros, ou assumida apenas empiricamente pelo arquiteto, na medida do seu contato com a área, contexto que pode ter implicações, quer nos limites da criatividade, quer na efetividade da implantação do projetado, por muito que faça sentido, face a todos os outros critérios estudados.

O processo operativo resulta do cruzamento disciplinar da teoria da arquitetura com a computação; esta junção permitiu articular, uma sólida base teórica, expressa no Ensaio da Razão Compositiva, com meios digitais. Esta integração consubstancia a aplicação do “*contínuo digital*” à prática da arquitetura através de um modelo operativo/teórico.

Esta abordagem permitiu estabelecer um conjunto de interligações, entre a base teórica de projeto definida na metodologia de Mahfuz e os processos digitais que corporizam o “*continuo digital*” fundamentado no CAD/CAE/CAM.

Estes conhecimentos, apesar de provirem de contextos disciplinares destintos, concretamente o “*Continuo Digital*” e o “*Ensaio da Razão Compositiva*”, convergem numa visão holística, que cobre todo o espectro presente na prática do projeto arquitetónico e permitem abordar assim de modo articulado a conceção e a construção.

Deste modo, a grelha operativa construída nesta tese, pretende:

- a) Consubstanciar uma abordagem capaz de integrar a dimensão conceptual e a dimensão tecnológica, na prática do projeto, respondendo assim, às exigências decorrentes das superfícies curvas;
- b) Conferir solidez teórica e metodológica, à utilização dos processos digitais em esquemas taxonómicos;
- c) Responder aos desafios colocados pelo novo paradigma conceptual, o já referido “contínuo digital”, no qual se exige um novo quadro mental e cognitivo, decorrente de uma prática concetual, orgânica e simultânea, no domínio quer da representação, quer das diversas especialidades, pela qual é possível compulsar interactivamente as implicações, decorrentes de alterações sucessivas, paralelas ou simultâneas.

A solidez operativa da grelha concebida permite abordar as situações de projeto, que se revistam de uma especial complexidade e na qual se exija uma forte articulação entre a conceção e a construção, com é o caso das formas curvas e de dupla curvatura.

Contudo, tem-se a noção de que, enquanto “grelha” operativa, a mesma baliza, mas não enquadra nem contextualiza o caminho (*iter*) operativo (teoricamente) fundamentado, necessário à materialização prática do fim último da Arquitetura, o desenho das *Guide Lines* da praxis conceptual e construtiva, também das superfícies curvas e de dupla curvatura, onde é possível incubar a ideação do Arquiteto até à manifestação da peça.

É assim que se de forma (con)sequente se apresenta uma proposta de diagrama executivo destinado a permitir a compreensão e o acompanhamento intelectual da praxis projetual advogada.

8.2 Taxionomia

O desenho do paradigma operativo começou com a definição de um esquema taxonómico próprio, cuja definição teve em conta as especificidades da conceção e construção das superfícies curvas.

O diagrama executivo desenhado apresenta um carácter linear, no a utilização do sistema construtivo Brick-Warp é contemplada. O elevado grau de abstracção da taxinomia possibilitou a construção do paradigma operativo proposto, esta resulta do seu aprofundamento articulando tarefas, rotinas e os meios disponíveis.

O esquema taxionómico define nesta fase a articulação dos meios e das suas possíveis interações, definindo assim ciclos de trabalho.

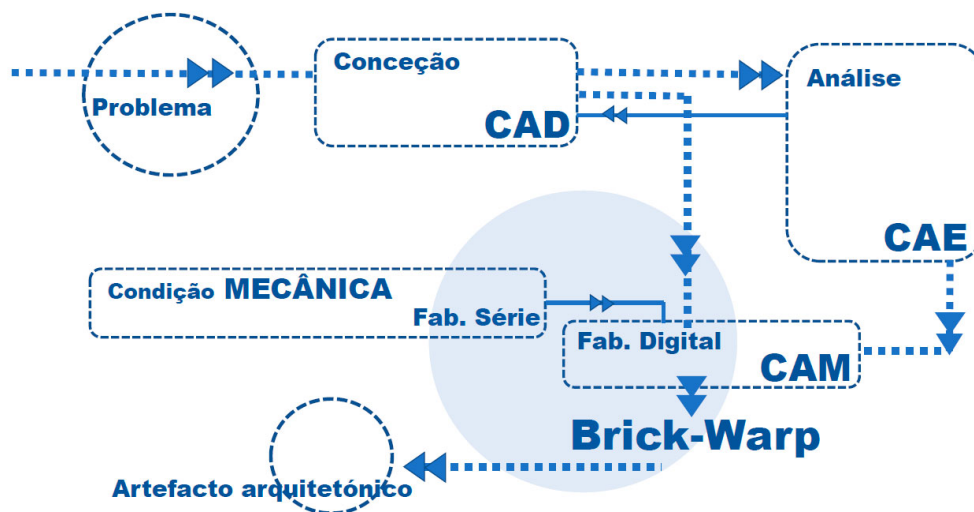


Figura 8.3 – Esquema taxionómico para a conceção e construção das superfícies curvas
(do autor)

Os axiomas operativos que emergiriam da análise de um conjunto de obras e dos princípios que veiculam permitiram a densificação do esquema taxionómico, transformando-o num paradigma operativo que conduz e suporta a conceção e construção das superfícies curvas.

8.3 Paradigma operativo

De modo a permitir uma leitura e compreensão intelectual da metodologia e não da materialização operativa das etapas do processo conceptual do projeto, a Grelha operativa anterior é agora desmontada em quadros parciais que visam deixar antever a

implementação progressiva dos itens necessários ao que se considera uma prática sólida de projeto.

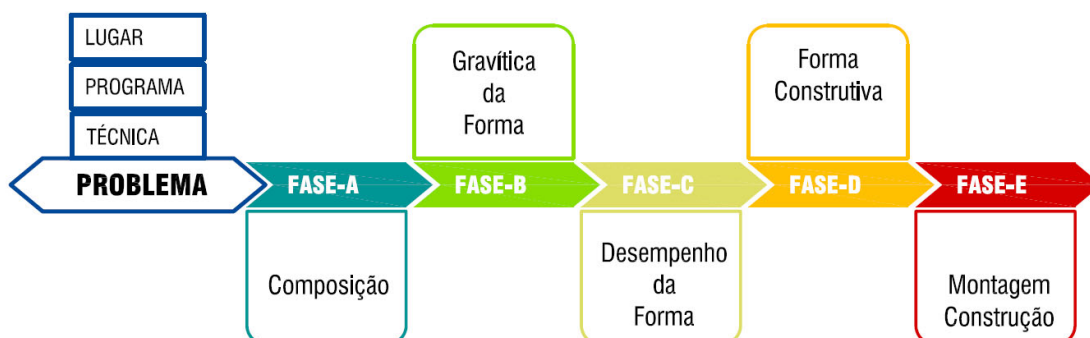


Figura 8.4 – Paradigma operativo para a utilização de meios digitais na conceção e construção de superfícies curvas
(do autor)

Fase A; a qual o leitor encontrará correspondência teórica no subcapítulo 8.9, *infra*, no qual se explicita a memória descritiva respeitante à **Composição**, esta tem como base os vetores do problema (Lugar e Programa) do qual resulta do processo dialético entre o espaço e a função que consubstancia a Organização espacial que define o Envelope espacial.

Fase B; a qual encontrará correspondência teórica no subcapítulo 8.10, *infra*, no qual se explicita a memória descritiva respeitante conceito da **Gravítica da forma**, esta decorre da passagem do conceito abstrato da geometria, sem espessura (imaterial), ao conceito de forma esta aporta espessura, vinculada a uma definição material generica, logo sujeita à gravidade e ao conseqüente peso próprio. A definição de Forma implica o conseqüente funcionamento estrutural e a procura de um equilíbrio.

Esta fase corporiza os aspetos relacionados com a dimensão qualitativa da forma.

Fase C; a qual encontrará correspondência teórica no subcapítulo 8.11, *infra*, no qual se explicita a memória descritiva respeitante ao **Desempenho da Forma**, esta é manipulada com vista à sua otimização ao nível do funcionamento estrutural e

comportamento estrutural - dimensionamento. Esta fase reflete sobre a dimensão quantitativa da forma.

A dimensão construtiva começa a ser introduzida, sendo formulada uma solução construtiva (envelope construtivo) que sofre uma avaliação ao nível da térmica, acústica, lumínica, e mesmo da sua viabilidade financeira. Ainda no domínio do comportamento da Forma é definida a paginação da forma (*Tesselation*) em função do funcionamento estrutural.

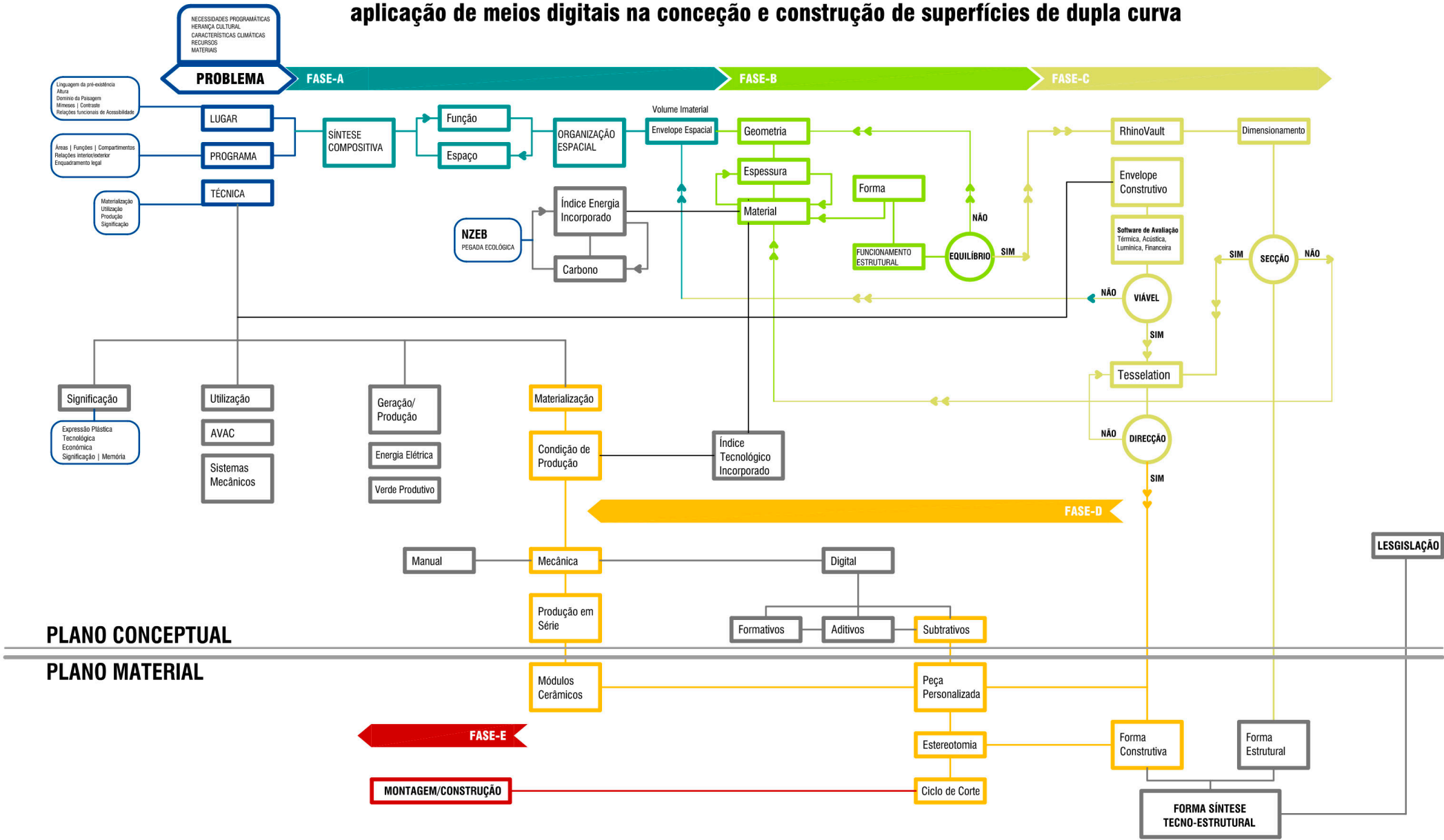
Fase D; apresenta correspondência teórica no subcapítulo **8.12**, infra, no qual se explicita a memória descritiva respeitante ao conceito da **Forma Construtiva**, esta expressa a organização dos meios de produção e fabricação, no sentido de desenhar um processo de produção das peças que compõem a forma, definindo assim uma tecnologia construtiva para implementar a Forma.

Fase E; apresenta correspondência teórica no subcapítulo **8.14**, infra, no qual se explicita a memória descritiva respeitante à Montagem, este momento corresponde à materialização da forma, é o culminar do paradigma operativo.

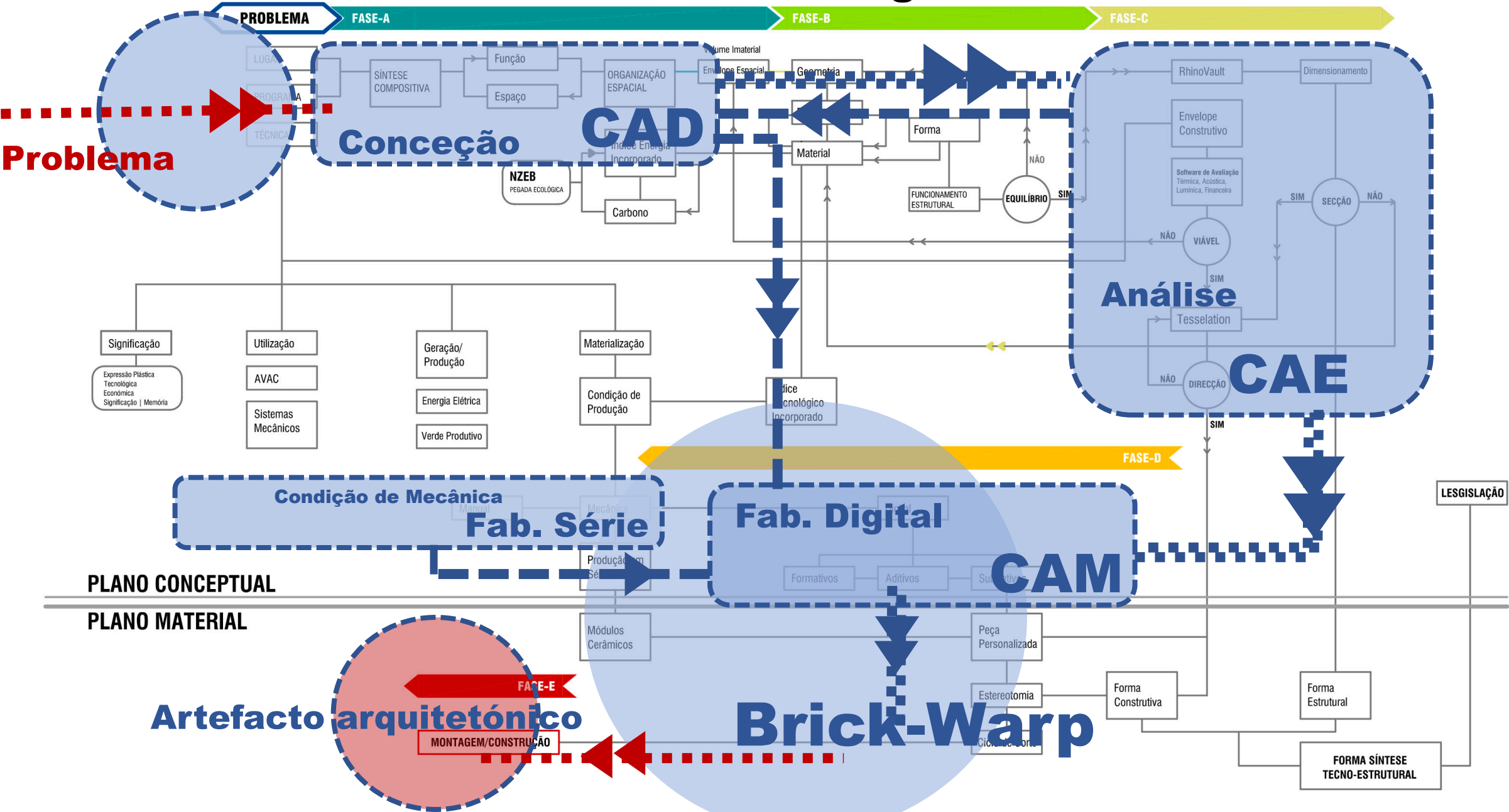
O paradigma operativo proposto tem como base algumas bases teóricas e técnicas, que merecem uma abordagem previa à sua explicação. O introito permitirá uma maior contextualização dos pressupostos que fundamentam o desenho desta metodologia, permite ainda a compreensão dos axiomas operativos usados e a sua articulação.

Paradigma Operativo

aplicação de meios digitais na conceção e construção de superfícies de dupla curva



Taxionomia/Paradigma



8.4 Teoria de projeto

Neste subcapítulo é feita uma síntese do trabalho teórico produzido por Edson Mahfuz procurando-se a sua contextualização no âmbito da presente tese.

A reflexão teórica produzida por Edson Mahfuz é fruto de uma visão abrangente que procura articular a dimensão conceptual em consonância com a dimensão construtiva na arquitetura, revelando-se particularmente adequada na contextualização metodológica dos processos digitais na abordagem de esquemas taxonómicos.

Da abordagem feita por Mahfuz, ressalta uma análise compreensiva que procura abordar simultaneamente, por um lado, a diversidade e, por outro, a fragmentação, em ambos os casos, da produção arquitetónica contemporânea, bem como, ainda os respetivos princípios intrínsecos, fazendo emergir uma matriz conceptual, que o autor explana no “*Ensaio da Razão Compositiva*”.

Segundo Mahfuz (2006) o conceito de belo é relativo e dinâmico, dependendo de uma conjugação de critérios individuais, fatores temporais e geográficos. Dada a complexidade e o grau de subjetividade que envolve a conceção da forma, a criação do artefacto arquitetónico, deve ser marcado pela pertinência e adequação da respetiva forma, aos “*aspetos projetuais*”.

Para o autor, o processo conceptual da arquitetura, é despoletado pela colocação do “Problema”, sendo este definido por três condições internas, a saber, o Programa, o Lugar e a Técnica.

O *Lugar* é um elemento estruturante do processo ideativo, sendo como que o palco das relações múltiplas, que o artefacto estabelece com o local de intervenção, recorrendo à utilização dos diferentes aspetos da linguagem decorrente das pré-existências, desde a cota ao domínio da paisagem, com recurso a *mimetizações*, ou *camuflagens*, ou ao *contraste*; ou ainda às relações funcionais da acessibilidade.

As obras arquitetónicas não só fazem parte do lugar, como elas próprias se constituem como lugares; daí a relevância desta relação, que levou Fiori a considerar a arquitetura como a “produção de lugares”. (Fiori, 2005:23)

O *programa* é um aspeto essencial no desenvolvimento do projeto. Estabelece as suas premissas, que transcendem a mera lista de compartimentos, áreas e funções. A análise e manipulação programática, permite ainda, a estabelecer uma relação entre os espaços interiores e exteriores. O desenvolvimento da proposta programática contempla assim a definição da permeabilidade, bem como a caracterização material das superfícies de oclusão. (Mahfuz, 2006)

A *técnica* é outro aspeto importante a ser considerado no exercício de projeto, por se relacionar diretamente com a resolução do programa, na medida em que permite não só, a materialização do artefacto arquitetónico, como igualmente a viabilização, o funcionamento e o uso da edificação.

A trilogia definida confere deste modo uma base conceptual ampla, capaz de abarcar todo o processo, intrínseco à prática da arquitetura. Esta base extrapola o âmbito quase sempre presente nas abordagens tradicionais à teoria de projeto, as quais focando-se nos processos compositivos e funcionais, relegam normalmente a dimensão da tecnologia na arquitetura para um estado latente, não tirando, assim, partido das suas reais potencialidades, no momento de projetar.

O início do desenvolvimento do projeto dá-se com a definição do *problema*, em cujo domínio se consubstanciam os respetivos requisitos ou imperativos de projeto, isto é, as necessidades programáticas, o substrato cultural, o contexto climático e orográfico, bem como os materiais e os recursos disponíveis (Mahfuz, 1995: 22)

Paradoxalmente, assim, o arquiteto nunca é senhor absoluto mas um mediador no ato de projetar o objeto arquitetónico; ele dialoga e gere uma multiplicidade de aspetos, como “a técnica construtiva, os materiais, os métodos e recursos humanos, o clima e tempo, as condições físicas e topográficas do sítio, o programa de necessidades” e, acrescentamos nós, muitas vezes propositadamente não referidos, mas que acabam por ser tão ou mais determinantes, os usos e costumes, o objetivo do empreendedor; o financiamento da obra e o encontramento legal pertinente.

O carácter metódico do projeto permite ordenar o pensamento do arquiteto. A “*ideia preliminar*” é o início do processo conceitual, trata-se de uma inspiração (Lemos, 1980: 41-42). A ser assim, a evolução do projeto deve ser pautada por um conceito geral, que permita organizar e sintetizar as ideias preliminares, i.e., o “*todo conceptual*”; trata-se

essencialmente no entanto de delinear uma ideia com força motriz, capaz de gerar um fio condutor, que organize de um modo coerente a estrutura compositiva.

O “*todo conceptual*” é definido por Mahfuz (1995:25), como algo que se consubstancia na síntese de ideias e que, contudo ainda não tem presença, não tem forma, é impessoal e existe apenas no domínio mental do arquiteto. É este conceito geral, que determina a organização das partes, o “*todo compositivo*” e que permite a formulação gráfica da ideia preliminar.

É a concatenação, - quer dos aspetos intrínsecos, quer do envolvimento do projeto (programa, técnica e lugar) quer ainda dos aspetos externos ao problema de projeto, decorrentes da organização das partes - que permite o “*todo compositivo*”, isto é a estrutura compositiva.

O “*todo concetual*”, contem a essência e as informações que suportam o processo ideativo, qualquer que de qual seja o projeto.

Por definição, todo o espaço antrópico tem, à priori uma “*ideia preliminar*” e à posteriori uma “*consequência formal*” a que Lemos (1980) chama de “*partido*”. Assim o “*todo conceptual*” tem como veículo o “*partido*”, pelo que fazendo agora apelo em concatenação, ao pensamento de Mahfuz, pode gerar-se a conclusão de que este responde aos imperativos do projeto e é um estágio intermediado entre o “*todo conceptual*” e o “*todo construtivo*”. (Mahfuz, 1995: 24-25).

O “*todo concetual*” é um elemento de projeto que permite ao arquiteto fazer o registo gráfico do edifício e esta representação alográfica da “*ideia preliminar*” resulta num “*partido*”, que permite não só uma primeira avaliação das respostas ao “*problema*” expresso pelo “*programa*”, como ainda efetuar uma aferição primária, da viabilidade da solução, constituindo-se desta forma com um espaço de diálogo com o cliente.

Para Mahfuz (1995:24-25) a passagem do “*partido*”, para o “*todo construído*” reveste-se de uma especial complexidade, na medida em que decorre da articulação das soluções tectónicas com o “*todo conceptual*” no âmbito da “*ideia preliminar*”.

Neste contexto Jantzen afirma,

[...] a solução do problema de projeto é sempre a coordenação criativa (que cria unidade) das soluções dos sub-problemas que foram detalhados a partir

daquele problema maior. O que há para coordenar, encontra-se a partir dos sub-problemas? Há questões da forma, (da) configuração dos elementos, do funcionamento, da utilização específica de espaços, das escolhas dos sistemas estruturais adequados, dos materiais, tecnologias e das suas respectivas adaptações, de relações com o entorno da obra futura, de vínculos com o ambiente natural e uma série de outras particularidades que aí podem ser agregadas. Também há questões culturais, de valor simbólico de sítios, ou de valor histórico. Há questões da vivência humana e muitas outras [...] Jantzen. (2000, texto 09)³⁷

A riqueza dos detalhes, que compõem a parte material dos elementos arquitetónicos, gera uma multiplicidade de interações, e entre estes elementos e a *ideia preliminar*, conferindo um elevado coeficiente de dificuldade ao ato de projetar. A complexidade da prática do projeto resulta da concatenação dos diferentes elementos que compõem a arquitetura e das suas diferentes dimensões, das quais se destaca uma dimensão tectónica, determinante na sua caracterização material, enquanto fim último do projeto de arquitetura.

A passagem do “*todo conceptual*” para o “*todo construído*” revela a complexidade que resulta das relações e conexões entre os elementos que materializam o artefacto arquitetónico, i.e., as “*partes materiais*” e os princípios que norteiam a proposta de projeto, plasmados no “*partido*”. O processo de conceção deve assim ser entendido pelo modo com as partes são organizadas.

E é a passagem do “*todo conceptual*” para o “*todo construído*”, que faz emergir dentro do processo de projeto uma dimensão tecnológica.

Para Silva (2003) este tempo de projeto é definido como um processo de síntese que mescla as teorias de produção e a excelência do conceito arquitetónico, sintetizando a imagética da ideia na resolução do artefacto arquitetónico. Para este autor é a consequência da fusão da bagagem cognitiva, esta deve ser ampla e diversificada, com a atitude, a ideologia e a visão do mundo.

³⁷ Arquitetura Banal – Conceito utilizado por Mahfuz (1995, p. 32), apresentado na Fig.8.5, e ilustrado esquematicamente no processo de projeto arquitetónico; arquitetura sem significado.

A “ideia preliminar” no âmbito do “todo conceptual”, revela-se pela manifestação da “consequência formal” no âmbito do “partido”, e a sua passagem para o plano material através das *partes materiais* afirma a dimensão tectónica do projeto que corporiza o “todo construído”.

Neste momento de passagem do *plano conceptual* para o *plano material*, todas as informações relativas à materialização do artefacto arquitetónico são pertinentes e devem ser observadas. A definição dos elementos da arquitetura, concretamente das “partes materiais” relacionam-se diretamente com o ênfase dado à “*projetualidade*” do edifício.

O “todo construído” aponta para um artefacto *construído* por partes *organizadas*, com base num “partido” como conclusão do “todo compositivo”; sendo este definido por elementos conceptuais pautados por um princípio organizacional. É necessário copenreender que se trata de um processo em que o *todo* é gerado pelas *partes*, mas em que o *todo* é necessariamente mais do que as *partes* (*Gestaltung*).

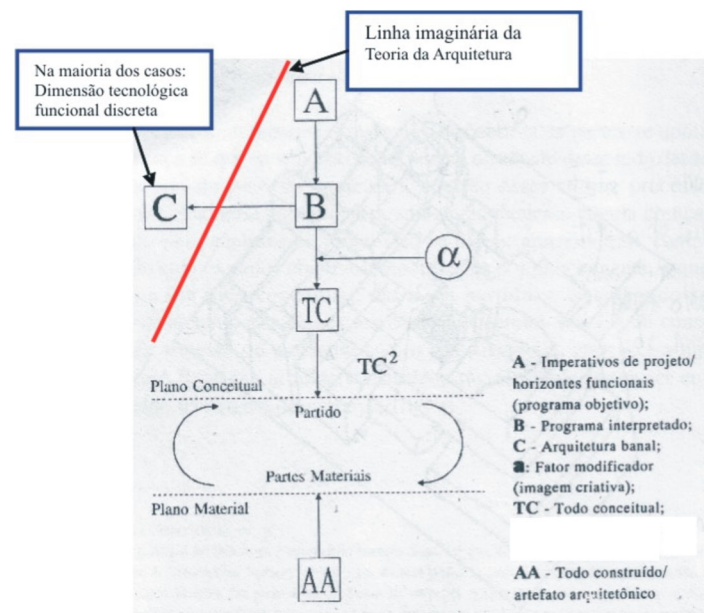


Figura 8.5 – O processo de projeto arquitetónico.

(A tecnologia no processo de concepção arquitetônica contemporânea, 1995: 32)

Na Fig. 8. segundo Mahfuz (1995:32), o ciclo do projeto arquitetónico inicia-se com os dados objetivos que caracterizam o programa, pelo qual se induz o aparecimento de ideias que vinculam as diferentes dimensões presentes na conceção do projeto, assim corporizando o “todo conceptual” a materializar através do “partido”. Tendo um papel instrumental é uma ferramenta que permite ao projetista fazer o registro gráfico da ideia preliminar do edifício enquanto “consequência formal”.

Nesta fase de organização material do “*todo construído*”, os elementos compositivos da arquitetura relacionam-se diretamente com a dimensão tectónica, articulando-se nesta etapa a ideia da edificação, do “*todo conceptual*” bem como a respetiva significação arquitetónica, com as suas diversas consequências de ordem tecnológica (estrutura, instalações, técnicas construtivas, materiais de construção) a que se deverá acrescentar por fim as implicações económicas e legais inerentes à solução.

A compatibilização destes diferentes aspetos pode mesmo implicar modificações da “*ideia preliminar*”, quando se mostram difíceis de conciliar os respetivos, dimensão técnica, interesses e normas de diversa natureza (físico-matemáticas, de estilo ou linguagem, jurídicas, etc.) em presença. Nesse caso a alteração do “*todo conceptual*” permite acolher com eficiência os ajustes necessários para que a articulação das diferentes partes que compõem o “*todo compositivo*” sejam coerentes.

Para Oliveira (2003:2) o “*todo construído*” extrapola a adequação tecnológica das soluções ou o mero cumprimento dos requisitos funcionais. Este deve observar os aspetos cognitivos da forma, isto é, a significação e o simbolismo que a forma transporta. É a qualidade do “*todo conceptual*” que diferencia o todo construtivo da *arquitetura banal*.

A objetivação do “*todo construído*” adquire uma definição que decorre do potencial do projeto e da bagagem do projetista e, assim, através da representação é dado um maior ênfase aos elementos construtivos na composição. (Mahfuz, 1995:25)

O “*todo arquitetónico*” é um fenómeno complexo, com várias dimensões, na medida em que é composto por elementos heterogéneos, que são unificados através de princípios estruturantes, os quais compõem a trama do “*todo conceptual*” (sendo obviamente a “*teia*” o produto do labor do arquiteto. “Ele passa a existir através das suas partes, é criado por meio de um processo no qual a *parte* é a unidade básica de produção” (Mahfuz, 1995:36)

Mahfuz diz-nos que o plano conceptual é transcendido quando o “*todo conceptual*” começa a ser cristalizado através do “*partido*” enquanto “*consequência formal*” o qual integra as partes físicas durante o seu desenvolvimento, as quais irão caracterizar o “*todo material*” que é formalizado pela peça arquitetónica.

A passagem do “*plano conceptual*” para o “*plano material*”, resulta de uma síntese produzida através da organização das *partes*, que se consubstancia na “*consequência*

formal” ou “partido” podendo este ser alterado pelas partes físicas. A escolha dos elementos que caracterizam a dimensão tectónica da arquitetura resulta, assim, de muitos e variados aspetos, de génese diversa, desde a idiossincrasia do projetista, ~a sua formação, ou à tendência arquitetónica em que se insere.

De todo este processo resulta que a definição material dos elementos que compõem a peça arquitetónica, resulta do grau de valorização dado à dimensão tecnológica presente no ciclo de trabalho.

A dimensão tecnológica presente na arquitetura apresenta-se sob vários aspetos, de que não será demais destacar o ato de projeto, corporizado pelo “contínuo digital” em que se atém às ferramentas e meios digitais utilizados na peça arquitetónica. Por isso, pode afirmar-se que a respetiva influência se mostra em dimensões diversas como a tectónica, a funcional, a produtiva e a simbólica.

8.5 Técnica

A técnica segundo Mahfuz é um dos aspetos internos do “*Problema*” no processo de conceção e é por isso elemento importante elemento a considerar na prática da Arquitetura. É normalmente associada à execução da construção, ao sistema construtivo, mas na realidade, o seu papel extrapola este âmbito.

O presente paradigma aborda a tecnologia de um modo amplo, contemplando os vários domínios e dimensões, que este elemento do tripe definido por Mahfuz abrange, deste modo o paradigma contempla; a significação, a utilização, a geração/produção por fim a materialização.

8.5.1 Utilização

A dimensão tecnológica da arquitetura é vasta, estando vinculada também à utilização do edificado, esta componente manifesta-se através de sistemas mecânicos de vária índole, os quais permitem uma utilização do espaço de modo mais afável – (elevadores, Avac, redes de telecomunicação, sistemas responsivos de controlo de luz, entre outros.

Estes sistemas aportam à construção um conjunto de aspetos relevantes, em algumas situações é a infraestrutura que viabiliza o artefacto arquitetónico, sendo determinante para organizar o seu funcionamento. Atente-se ao caso dos elevadores nos edifícios de grande altura, sem a sua existência, não seriam viáveis, ou ainda as redes informáticas que são determinantes para os processos de trabalho quotidiano. A sua ausência acarretaria uma configuração espacial diferente ou mesmo inviabilizaria funcionalmente o edifício.

Outro o aspeto relevante decorrente da utilização, a que o arquiteto deve ter atenção relaciona-se com os custos intrínsecos operacionais do edifício, estes contribuem para o valor final do edifício. O arquiteto deve pois equacionar e adequar estes meios de um modo racional e eficiente, para que este se traduzam numa mais valia e não num acréscimo de custos.

8.5.2 Significação

8.5.2.1 Significação pela estrutura

O carácter plástico que a estrutura pode veicular e o aparato tecnológico decorrente da utilização e da produção, em certos casos conferem um carácter simbólico à arquitetura, enquanto imagem, podendo conferir um cunho representativo ao edifício, reforçando-lhe ou conferindo-lhe carácter, mas em qualquer circunstância, vinculando contudo a sua imagética ao aparato tecnológico.

O processo de composição recorre por vezes, a elementos do âmbito tecnológico, como modo de caracterização formal e espacial, conferindo significação ao objeto arquitetónico. Tal pode expressar-se no desenho e manipulação dos elementos que compõem os sistemas solares passivos, que visam a proteção solar, na conceção da forma da cobertura, no desenho de ductos e infra-estruturas, com vista a, daí, tirar proveito plástico. Todos estes elementos arquitetónicos podem assim configurar-se como um veículo de representação e significação da obra.

A “*significação*” na arquitetura tem também com um dos veículos expressivos o sistema estrutural. Angus Macdonald, reflete sobre assunto no livro *Structure and Architecture*, onde define três categorias desta relação; carácter simbólico; critérios descontextualizados e validade técnica questionável. Os argumentos e exemplos dados

demonstram com clareza os processos de significação da obra arquitetônica através da tecnologia, mas também alguns dos seus riscos.

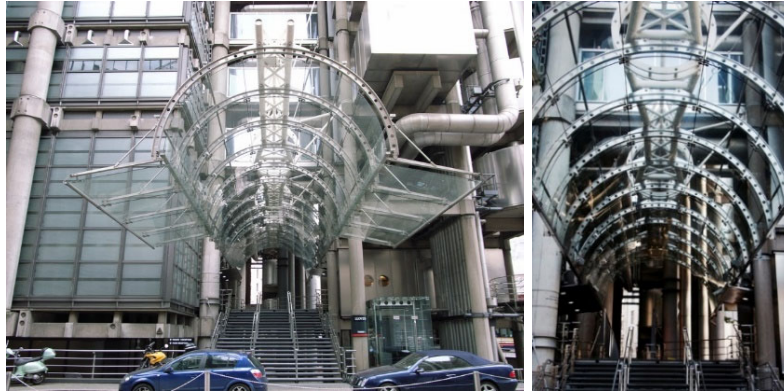


Figura 8.6 – Sede Lloyd'sbank Londres, Inglaterra, 1986, Richard Rogers
(Angus Macdonald, 2001: 76)

No *caráter simbólico*, a estrutura é usada para passar uma imagem, normalmente associada à ideia de progresso e de excelência através da tecnologia, criando-se desta forma um imaginário que celebra o próprio avanço tecnológico. A arquitetura manipula o sistema estrutural no sentido de produzir imagens simbólicas, daí resultando a utilização de um léxico formal que utiliza soluções oriundas, por exemplo, da indústria aeroespacial, ou recita o imaginário da ficção científica.



Figura 8.7 – Sede Lloyd'sbank Londres, Inglaterra, 1986, Richard Rogers (esq) Centro Pompidou, Paris, França, 1977, Renzo Piano e Richard Rogers (dir)
(Angus Macdonald, 2001: 77)

A manipulação do sistema estrutural é feita com vista à criação de cenários tecnológicos, gerando-se assim contextos, em que os sistemas estruturais são inapropriados do ponto de vista tecnológico e estrutural, conferindo eventualmente às peças arquitetónicas uma eficácia estrutural duvidosa. (Macdonald, 2001: 79)

Outra das categorias definidas pelo autor, resulta de critérios desajustados, que são referidos sob a referência “critérios descontextualizados”. Aqui a estrutura revela-se coerente do ponto de vista tecnológico e do seu desempenho mas, contudo desajustada à realidade. A estrutura responde a um cenário estrutural efabulado pelo exagero do projetista, que não corresponde à realidade funcional do projeto.

Os princípios estruturais expressos no projeto, são questionáveis dado que se recorre a um conjunto de elementos de alta performance, por exemplo, para fazer face a um vão que não justifica todo esse aparato. Deste modo, o edificado adquire um carácter simbólico, expresso pela utilização de estruturas ligeiras, tais como elementos treliçados, perfis metálicos, vigas vierendeel.

A fábrica da Renault no Reino Unido, projetada por Foster, é gerada a partir de um módulo icónico, que se distingue por uma imagem de qualidade e de *design*. Com a construção deste edifício a marca pretende vincular-se a estes valores.



Figura 8.8 – Edifício da sede da Renault, Swindon, Inglaterra, 1982, Norman Foster
(Angus Macdonald, 2001: 21)

O sistema estrutural é gerado, pela associação de pórticos com contra cabos, que diminuem o momento fletor. A solução é normalmente utilizada, para tipologias de grande vão, tais como pontes. Já as vigas perfuradas visam a diminuição de peso, fator

fundamental na indústria aeronáutica; ora todo este aparato estrutural visa o aumento do desempenho e a diminuição do peso do sistema estrutural, algo dificilmente justificável para o vão em causa.

As soluções são aplicadas pelo carácter formal e pela expressividade que conseguem obter, mas onde as solicitações estruturais a que estão submetidas ficam muito aquém das suas performances, sendo que por este motivo, a sua utilização é altamente questionável do ponto de vista do ajuste tecnológico. (Macdonald, 2001: 82)

A *validade técnica questionável* é marcada por uma conceção desajusta e inapropriada, na qual o sistema estrutural apresenta um carácter expressivo e com uma “validade técnica questionável”. O exemplo desta categoria é a sede do Lloyds Bank, projetado pelo arquiteto Richard Roger, em que este edifício de escritórios, apresenta uma planta retangular com um átrio central, que no piso térreo se transforma num donut retangular.

Os pilares são localizados fora do perímetro das lajes, a carga aplicada deste modo aumenta o efeito de excentricidade em relação aos pilares. Como pode depreender-se, do ponto de vista estrutural este fenómeno é altamente indesejável.

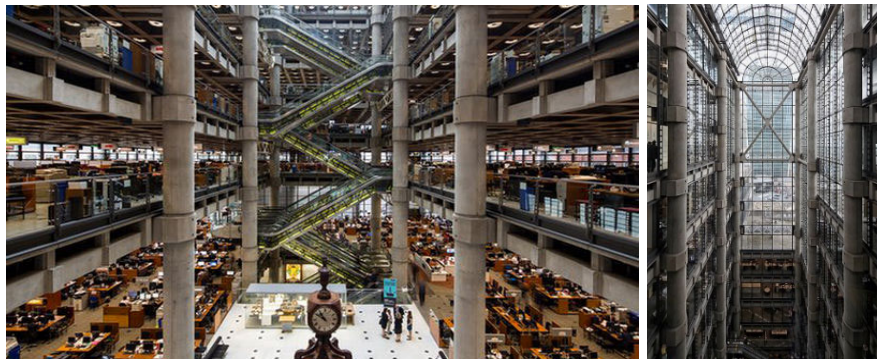


Figura 8.9 – Átrio Lloyds Bank, Londres, Inglaterra, 1978, Norman Foster
(Angus Macdonald, 2001:85)

Embora numa certa perspetiva possa ser questionável, esta solução foi adotada para enfatizar a expressão da estrutura, que era uma das preocupações conceptuais do projetista. Rogers pretende enfatizar a expressão visual das diferentes partes que constituem a solução, facilitando a leitura dos vários elementos.

As ligações entre as lajes e os pilares são feitas através de elementos pré-moldados, o que induz momento fletor e provoca uma concentração de tensões nas juntas. Deste modo, resulta inegável que a busca de uma solução construtiva legível, acarreta problemas estruturais sérios. (Macdonald, 2001: 85)

Outro dos desígnios visuais, passam pelo tratamento a dar às vigas, tendo estas sido biseladas para quebrar a aparência paralela. A forma cónica gerada, estreitou a parte superior da viga, implicando esta configuração que a descofragem fosse feita pela parte de cima da viga, o que impossibilita uma continuidade física entre as vigas e as lajes, deste modo afetando o desempenho ou, em inglês, a performance da solução.

A conceção estrutural deste edifício foi pautada por decisões de carácter visual, penalizando fortemente o desempenho da estrutura.

Estes exemplos devem fazer-nos refletir sobre o propósito tecnológico na arquitetura; este deve ser ponderando pela racionalidade e eficiência das soluções, ajustando-se ao lugar, ao índice tecnológico disponível, aos recursos materiais e à eficiência estrutura, a dimensão tecnológica na arquitetura resulta algumas vezes do fenómeno de transferência, na qual as soluções tectónicas desenvolvidas para contextos de alto desempenho ou, alta performance, são utilizadas e modificadas no sentido de darem resposta a contextos menos exigentes, em que esta lógica não parece demonstrar vantagem ao nível da eficiência.

Pode dar-se como exemplo desta opção, a adoção de uma tecnologia desenvolvida pela indústria aeronáutica, com o sentido de dar resposta específica a um nicho altamente diferenciado; ao ser contextualizada noutra realidade, correm-se sérios riscos de esta perder a sua validade como tecnologia e assumir-se apenas como um simulacro visual.

A sofisticação e alto desempenho das soluções tecnológicas nem sempre se traduzem numa verdadeira eficácia das soluções arquitetónicas. A mais-valia da tecnologia para a arquitetura decorre da sua adequação ao contexto do projeto. Por este motivo, a mera sofisticação e alto desempenho das soluções podem revelar-se desajustadas, e desnecessárias para os níveis de desempenho espectáveis. Assim as soluções estruturais que apresentam um carácter marcadamente visual, pautado pela exuberância, e que estão sobredimensionadas, desvirtuam a vocação funcional da estrutura.

A tecnologia deve ser incorporada, com base numa sólida compreensão do contexto, de modo a aumentar o desempenho final da peça arquitetónica, através da conjugação dos materiais autóctones com a tecnologia.

As abordagens mais racionais/sustentáveis decorrem de uma miscigenação ponderada entre as soluções tradicionais e soluções disponibilizadas pela tecnologia, ajustada ao objetivo do projeto, de modo a que a solução final saia potenciada. As soluções tradicionais encerram uma eficácia normalmente sancionada pelo tempo, que advém da racionalidade decorrente da utilização dos materiais autóctones e da sua adequação ao clima e à cultura.

8.5.2.2 Significação da arquitetura através do material

O material é outro dos veículos da significação na arquitetura; o material associado às técnicas construtivas, vincula a arquitetura a um tempo, a uma memória, a uma identidade cultural.

A fundação Joan Miró (1975) desmente a ideia assumida por alguns arquitetos, que a alvenaria estrutural apresenta um carácter anacrónico. Josep Lluís Sert utiliza as abóbadas catalãs não pelo seu potencial expressivo, mas também por militância nacionalista, efetuado assim, uma afirmação do “catalanismo”³⁸, já que ao adotar esta solução tectónica procura demonstrar a identidade cultural da sua nação.

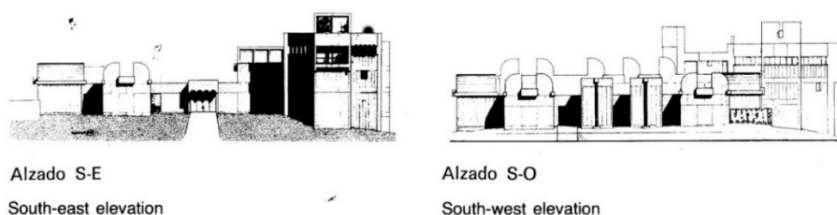


Figura 8.10 – Cortes Fundação Joan Miró, 1975, Barcelona, arq. Josep Lluís Sert
 (“Clássicos da Arquitectura: Fundação Joan Miró/ Josep Lluís Sert”, 2017)

³⁸ Catalanismo é um movimento orientado para a exaltação dos valores próprios e distintivos da personalidade histórica da Catalunha: as suas tradições, a sua cultura e a língua catalã.

Neste caso a significação do material é feita pela positiva e pretende evocar o passado da comunidade, para conferir memória ao edifício, neste caso, a técnica é uma afirmação da nacionalidade catalã, face à fase final do “Franquismo”³⁹.

As abóbodas catalãs jamais seriam utilizadas por Sert, se atrás de si não transportassem uma conotação contra o poder opressor de Espanha e do Franquismo. Esta é uma outra forma de utilização do significado dos materiais e dos processos construtivos, conferindo uma dimensão simbólica, às opções construtivas e aos materiais. Se repararmos bem, navegamos sempre no mar da memória Heideggeriana.

A fundação Miró funciona como um contraponto da visão modernista das abóbodas catalãs.

Um dos poucos arquitetos modernistas que explorou o potencial desta técnica foi o catalão Josep Lluís Sert, tendo sido ainda fundador de GATPAC em 1929 (Grup d'Arquitectes i Tècnics per al Progrés de l'Arquitectura Contemporània). Apresenta, pois, uma obra com forte vínculo ao movimento moderno.

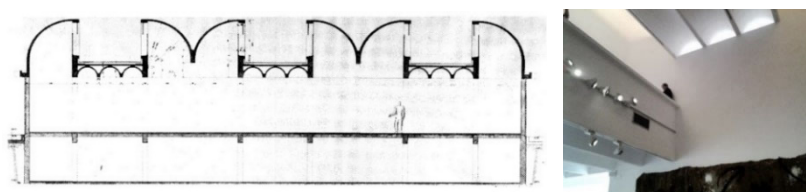


Figura 8.11 – Fundação Joan Miró, 1975, Barcelona, arq. Josep Lluís Sert
 (“Clássicos da Arquitetura: Fundação Joan Miró/ Josep Lluís Sert”, 2017)

Como se pode depreender do diagrama e das imagens, o funcionamento estrutural beneficia da tecnologia adotada, pela qual os impulsos horizontais das abóbodas colocadas em paralelo se auto equilibram, sendo as abóbodas periféricas contidas por vigas de bordadura.

³⁹ Franquismo é o regime político totalitário que foi implantado em Espanha pelo general Francisco Franco de 1936 até sua morte em 1975.

Foi assim possível gerar um sistema de coberturas que cumpre em simultâneo duas funções, a oclusão e o controlo da luz, aspeto relevante na conceção de um espaço expositivo, a articulação destes fatores com as abóbadas catalãs, resulta numa cascata de altimetrias, com múltiplos cambiantes lumínicos, que conferem ao espaço um vibração e identidade próprias.



Figura 8.12– Abóbada de forma livre, 2010, Zurique, Suíça, BRG
(Block Research Group, n.d.)

“O tijolo é um material milenar e moderno”; apesar da sua origem ancestral, consegue dar expressão material, às formas mais contemporâneas que a inventividade alcança, algo que muitos materiais e sistemas construtivos não conseguem. Ora, a modernidade de um material não é um exclusivo do “novo”, mas do que se mantém eficaz.

A sua origem popular permite uma disseminação mais fácil, por não haver lugar ao pagamento de direitos autorais, o que seguramente aconteceria caso o sistema tivesse sido desenvolvido por algum arquiteto.

A técnica construtiva utilizada pelas abóbadas catalãs foi capaz de responder aos desafios formais colocados pela morfogénese digital, revelando assim, toda as suas potencialidades e afirmando a sua contemporaneidade.

Este sistema responde às necessidades construtivas colocadas pelas ferramentas digitais de modelação geométrica, algo que sistemas com uma origem mais contemporânea, como por exemplo os pré fabricação, não conseguiram e, colocou em evidência o estágio embrionário em que se encontram as ferramentas de fabricação digital.

Como, pois, se perceberá, o grande desenvolvimento das ferramentas de prototipagem e fabricação digital não permite ainda assegurar com eficiência a construção de formas

complexas, podendo isto ser claramente comprovado pela abóbada *Armadillo*. Com efeito, este trabalho realizado para a Bienal de Veneza 2016, apresenta um extradorso em que a superfície é descontínua e intradorso tem um acabamento tosco, o que revela as dificuldades que existiram na produção da estereotomia.



Figura 8.13 – Abóbada Armadillo, acabamento do extradorso e intradorso, Venice Architecture Biennale, Veneza, Italia, 2016, BRG
(Block Research Group, n.d.)

O carácter vernacular da tecnologia ora em apreço coloca alguns problemas, pois o saber fazer foi-se perdendo e hoje torna-se difícil a realização de projetos, dado que este saber é exclusivo de uns quantos artesões.

A mão-de-obra é deste modo um fator determinante para a realização destes projetos, limitando a sua utilização em função dos custos inerentes. Existe um equilíbrio delicado, entre, por um lado o baixo custo do material e dos custos de produção e por outro lado o progressivamente elevado custo da mão-de-obra.

As condicionantes do sistema tornam-no particularmente atrativo para regiões com poucos recursos económicos, em que a mão-de-obra é barata, já em regiões com recursos económicos e com uma mão-de-obra cara, este sistema construtivo é impraticável, sendo utilizado apenas para situações excecionais como são os casos apontados neste capítulo.

O carácter artesanal do sistema revela-se competitivo quando comparado com outros sistemas artesanais, como a laje de betão, em termos de tempo de produção por m²,

mas confere-lhe uma rendibilidade baixa quando comparado com sistemas de produção em série, como seja o caso de lajes pré-fabricadas.

Podemos concluir que o material e a técnica construtiva transportam uma carga simbólica e tecnológica, sendo comutados com valores e princípios, que podem afetar a sua utilização, contudo, a contemporaneidade do material e da técnica resulta da sua aplicabilidade e da capacidade de responder aos desafios contemporâneos.

Apesar do da sua origem ancestral a alvenaria cerâmica apresenta a capacidade de responder aos novos desafios, pela sua flexibilidade e tolerância construtivas e é por isso hoje adotada para a construção de formas de grande complexidade geométrica.

8.5.3 Geração e produção

A produção/geração é um dos aspetos abrangidos pela técnica na arquitetura; consideremos para este efeito os sistemas solares ativos que produzem energia ou as coberturas verdes que permitem um verde produtivo (ou, no mínimo, isotérmico). Estes elementos apresentam cada vez maior relevância no processo de conceção, não só pelas suas potencialidades intrínsecas, como também pelas exigências específicas que aportam ao projeto, sendo ainda tidos por alguns como minimizadores dos impactos da construção.

Uma das vertentes da tecnologia que a Arquitetura acolhe é a componente de produção e geração, revelando-se esta de grande importância pois não só desafia o arquiteto ao incorporá-la na sua peça arquitetónica, como se traduz na redução dos consumos e emissões, diminuindo assim custos e impactos decorrentes da arquitetura.

A tendência atual é entender os edifício com um sistema, com ganhos e perdas energéticas, havendo a necessidade de mitigar as perdas e aproveitar os ganhos de modo a que estes compensem as perdas. Esta abordagem suporta-se na implementação de sistemas solares passivos e ativos, resultando estes últimos do aproveitamento da energia solar para produzir energia elétrica e térmica.

“A energia solar é a energia eletromagnética, cuja fonte renovável é o sol. Pode ser transformada em energia térmica ou elétrica, sendo aplicada em diversos usos. As duas principais formas de aproveitamento da energia solar são a geração de energia elétrica e o aquecimento solar de água”.

Na “produção de energia elétrica são usados dois sistemas: o heliotérmico, em que a irradiação é convertida primeiramente em energia térmica e posteriormente em elétrica; e o fotovoltaico, em que a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica”.

Estes processos envolvem equipamentos, que necessitam de áreas significativas, bem como de orientações específicas para potenciarem os níveis de produção. A arquitetura tem de saber acolher estas necessidades, ainda no processo de conceção, para que a sua utilização seja realmente eficiente e integrada.

As exigências legislativas que impõem obtenção de edifícios com necessidades energéticas próximas do zero – *nzeb*, já a partir de 2020, coloca em evidência a necessidade de articular estes requisitos com a ideia de projeto, no âmbito da “*ideia preliminar*”. Não obstante os dispositivos geradores de energia serem cada vez mais fáceis de aplicar à arquitetura, as suas especificidades devem ser equacionadas no ato ideativo, para que a sua integração e rendimento seja a mais eficiente possível.

Ainda no capítulo da produção, interessa atender de igual modo ao conceito de *resiliência urbana*⁴⁰, e as suas implicações na arquitetura.

Segundo a Organização das Nações Unidas – ONU, já em 2030 haverá pelo menos dois terços da população mundial a morar em centros urbanos⁴¹. A crescente pressão demográfica, exige da arquitetura respostas e, neste sentido, as coberturas verdes têm vindo adquirir uma importância significativa, havendo estudos que procuram extrapolar a capacidade de captura de carbono, em larga escala, destas estruturas.

Numa nota mais, eco-friendly ou biológica, haverá também a considerar a vertente produtiva, sobretudo hortícola, denominada de “verde produtivo” conceito através do qual se pretende produzir vegetais, proximamente ao consumidor e que, no Japão já

⁴⁰ A resiliência urbana é a capacidade que uma cidade tem de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se da exposição às ameaças, preparando-se para esses efeitos de maneira oportuna e eficiente, o que inclui a preservação e restauração de suas estruturas e funções básicas. Thomas Elmqvist – “Resilient Cities” (Stockholm Resilience Centre)

⁴¹ <https://evanderoliveira.jusbrasil.com.br/artigos/152036518/cidades-resilientes-novos-rumos-para-uma-cidade-do-futuro>.

possuem mesmo expressão comercial. É assim, possível superar cortes de abastecimentos ou a impossibilidade de deslocamento dos habitantes.

Também, o controlo das águas pluviais e das precipitações muito concentradas, pode ser obtido através destas coberturas, conjugadas com ductos de diversa natureza, os quais permitem moderar os caudais e assim evitar inundações. Este aspeto revela-se de particular importância em cidades ribeirinhas, e poderá permitir minimizar danos e prejuízos causados por estes fenómenos.

O aproveitamento de águas pluviais, a reutilização plurifuncional (por exemplo, para alguma atividade de limpeza ou, mesmo, a reciclagem para efeitos de consumo humano (atividade por enquanto demasiado complexa e onerosa para edifícios de pequena escala) são outros aspetos a vir progressivamente a considerar.

8.5.4 Materialização

Os diferentes patamares tecnológicos que podemos constatar ao longo da história, definem condições de produção específicas, que influenciam de modo efetivo a construção, logo aquilo, que o arquiteto desenha e concebe.

A noção das limitações e potencialidades de cada condição produtiva, permite gerir o espectro de soluções tecnológicas, de modo a corporizar a ideia conceptualizada.

A consciência desta realidade torna possível otimizar o ciclo de produção e construção da peça arquitetónica, tornando-a mais fiel à ideia inicial, mas também, controlando os meios e os tempos de construção, com consequências financeiras evidentes.

Esta gestão apresenta impactos na viabilidade dos projetos, do qual é exemplo as formas curvas. A sua eficiência e o seu valor plástico são inquestionáveis, contudo, não são utilizadas, por falta de um ciclo de conceção e/ou construção, que as torne economicamente competitivas, face a outras soluções formais.

As condições de produção dividem-se em três grandes patamares: Manual, Mecânica, Digital. Estas foram estudadas anteriormente (vide, Cap.VI). Importa agora refletir a sua aplicação ao universo formal da curvatura e da dupla curvatura.

O estudo efetuado revela as técnicas utilizadas para a sua implementação, que resulta de uma *Condição Manual*, não tendo existido, um investimento intelectual no sentido da sua evolução tecnológica.

A filosofia intrínseca à *Condição Mecânica* acolhe com dificuldade a personalização, sendo por isso, um claro óbice para a produção deste universo formal. Já a *Condição Digital* responde com eficácia a estes requisitos, enfrentando ainda os desafios geométricos decorrentes da sua utilização com facilidade.

Os processos CAM apresentam um estágio de evolução embrionário face aos processos CAD, pelo que, a implementação digital de um objeto com esta geometria à escala real é ainda um desafio por alcançar, veja-se o exemplo da Abóbada Armadillo efectuada para a bienal de Veneza (cfr., supra, Fig. 8.13).

O sistema construtivo apresentado (Brick-Warp) passa por uma solução híbrida, na qual se junta a condição mecânica e a digital, com vista a produzir um processo aqui designado por produção em série personalizável. Na qual a eficiência produtiva é equivalente à personalização.

Esta abordagem é um esforço efetivo para elevar a condição tecnológica destas formas, tornado a sua construção mais fácil e mais eficiente, potencializando assim a sua utilização na arquitetura.

8.6 Fase A

8.6.1 Composição

As abordagens normalmente propostas encaram a prática do projeto, de um modo redutor, como que um exercício de composição baseado em princípios estéticos e em teorias formais, os quais organizam e articulam elementos compositivos em termos de módulo, tipo ou tipologia). A este respeito Louis Durand (1760-1834) descreve a sua prática conceptual como um “*processo metodológico baseado na articulação de elementos e partes em planta e em fachada*” (Durand apud Consiglieri, 2000:147)⁴².

⁴² Victor Consiglieri, 2000, *As Significações da Arquitectura – 1920-1990*, Ed. Estampa, Lisboa, p.147

Pode assim dizer-se ser a metodologia de projeto ainda muito marcada por preocupações funcionais e compositivas, sendo dada pouca relevância aos aspetos tecnológicos ou, mesmo, ignorando o potencial da tecnologia no processo de conceção.

Esta ideia é reforçada pela produção no âmbito da teoria de projeto, a qual na sua generalidade aborda sistematicamente a conceção através da composição, raramente focando a dimensão tecnológica, estando mesmo mais virada para a análise e operação das regras, lógicas e princípios de composição. A pouca atenção dada à tecnologia é incompreensível, pois esta é uma das condições fundamentais para a concretização da arquitetura.

Esta prática de projeto não só ignora a dimensão tecnológica intrínseca à arquitetura, anteriormente enunciada por Marcus Vitrúvio, na *firmitas*, como também não compreende, que a caracterização tectónica e estrutural, emana da composição dos esquemas de distribuição funcional e da definição espacial. Pode, deste modo, perceber-se a força, o alcance, a profundidade, mas também a simplicidade de Rebello, quando afirma que:

“O ato de desenhar um pequeno compartimento de um edifício compromete o autor com a solução da estrutura que lhe dará sustentação.

O que acontece é que nem sempre o criador da arquitetura tem consciência de que no seu ato criador de espaços está intrínseco o ato criador da estrutura.” (Rebello, 2000: 26).

O ato de projetar pode por isso ser entendido como um processo dialético, no qual tomam parte não só o lugar e o programa, mas também a técnica, sendo esta decisiva para o cumprimento do desígnio final da arquitetura, concretamente, o *Habitar*.

Nestes termos, deve entender-se que, sem a técnica, a arquitetura não se manifesta materialmente logo não se cumpre enquanto tal, enquanto Arte (real e, logo, enquanto Arte Real). A componente tecnológica deve ser equacionada ainda nas fases embrionárias da composição, pois só deste modo se exponencia o processo ideativo.

Os axiomas operativos da grelha asseguram que a composição na sua vertente espacial e funcional seja sempre acrescida de uma consciência estrutural, sendo consequentemente a solução alcançada uma síntese capaz de articular a dimensão funcional, com a dimensão estrutural.

O paradigma operativo proposto tem como objetivo reforçar a dimensão tecnológica no processo ideativo, pretendendo-se assim, que esta faça parte da conceção ainda num estágio precoce, enquanto agente conceptual efetivo ao serviço da ideia do arquiteto, ao invés de correr-se o risco de a mesma se tornar um empecilho, com que este se depara ao integrá-la apenas numa fase de projeto já avançada. Em consequência dessa opção pode acontecer pôr-se em causa o conceito referido, do “todo conceptual”, para além do muito do trabalho realizado na sua cristalização formal (i.e., a “consequência formal”.

Com efeito, uma entrada tardia da dimensão técnica no processo conceptual pode mesmo em alguns casos implicar a alteração ou a desvirtuação da ideia inicial do projeto. Este risco é especificamente referido por Mahfuz (1995: 115-116) quando descreve a passagem do “todo conceptual” para o “todo construído”.

A articulação das premissas internas, definidas por Mahfuz, do problema, lugar e programa, com a “*ideia preliminar*” em que necessariamente se pondera a interacção entre espaço e função, produz uma síntese, na qual conseguimos ver emergir a *organização espacial*.

Este momento de composição ganha suporte mediante os empregos de processos geométricos, adequados a definir ritmo, proporção ou harmonia, caracterizando deste modo a composição numa organização volumétrica, a qual consequentemente cristaliza aquilo que se designou anteriormente pelo *envelope arquitetónico*.

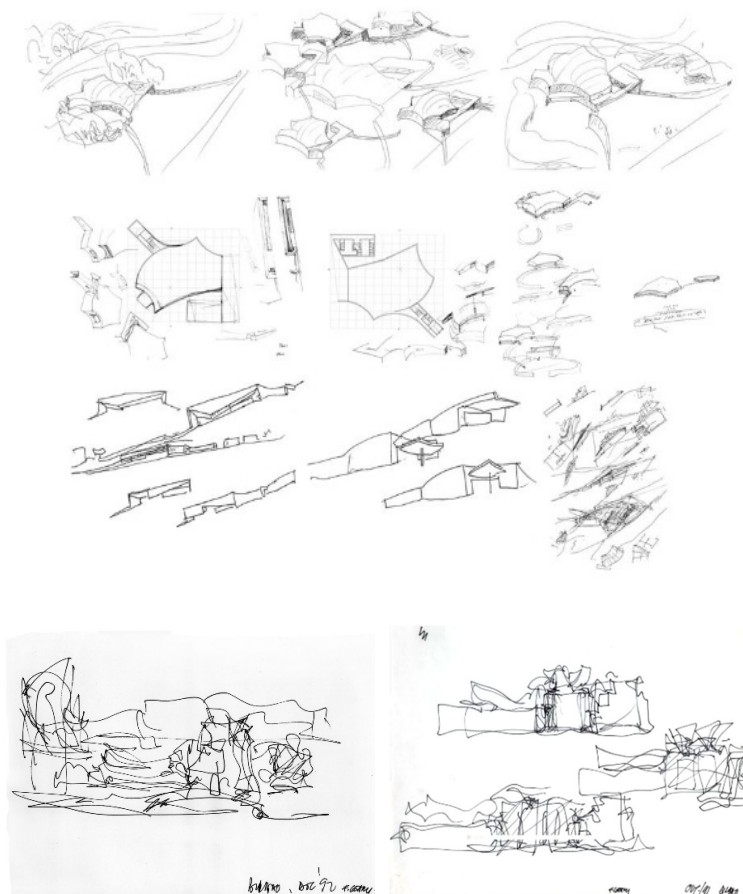


Figura 8.14 – Esquícios de Álvaro Siza Vieira, para o Pavilhão de Exposições nos Jardins de Anyang, Coreia do Sul(em cima). Esquissos de Frank O. Gehry, Guggenheim, Bilbao, Espanha (em baixo). (“Desenho de síntese”, n.d.)

Neste momento do processo conceptual, a forma ainda não existe enquanto tal; este conceito está ainda num plano geométrico e imaterial; é, se se quiser, um *contentor do espaço*, definindo-o formalmente, pois que, a volumetria não tem, por definição, espessura ou definição material (Fig 8.14).

Neste contexto, torna-se fatalmente necessário caracterizar o material e ter em conta a gravidade, para assim definir a forma; é o que se referiu acima, como a *gravítica da forma*.

A grelha operativa definida tem, como premissa conceptual, a interação entre a gravítica da forma e a geometria, como processos de configuração do espaço funcional da arquitetura.

Na fase de composição do projeto, este raramente é informado pelos desígnios da tectónica (ou da tecnologia) ficando esta dimensão para fases posteriores, sendo comum como se sabe, arrastar-se estas indefinições por vezes até ao projeto de especialidades. Não poucas vezes, a definição estrutural, e consequentemente construtiva, é encarada pelo arquiteto com algo que não faz parte do seu âmbito, nem dos atos próprios de arquiteto, como frequentemente acontece com o condicionalismo financeiro e, sobretudo, o jurídico.

8.7 Fase B

8.7.1 Gravítica da forma

O desenho da metodologia proposta, acrescenta a este momento compositivo a dimensão gravítica, pela qual esta visão acarreta um ajuste do processo cognitivo e conceptual, com reflexos na prática de projeto.

A geometria definida pelo envelope arquitetónico transporta já, pela sua própria natureza, a definição material e estrutural da forma. Parece contudo, ser necessária a tomada de consciência por parte do projetista desta realidade, o que implica a passagem do objeto de incidência da análise, do nível da geometria para o nível da forma, o que acontece conferindo espessura ao plano ou superfície imaterial definidos pela geometria.

Esta passagem, como não pode deixar de ser, implica conferir materialidade à superfície. A forma é assim a manifestação material da geometria e, ao incluir a abordagem da espessura, esta sofre, em consequência, a ação da gravidade, pelo que tem igual e necessariamente de acolher o transporte da força, decorrente do seu peso próprio, gerando-se deste modo e de forma orgânica, o funcionamento estrutural da forma.

A forma tem uma especial relevância na Arquitetura pois nada tem de imaterial, na medida em que é o contentor do espaço. Deste modo deve ser capaz, simultaneamente, de acolher as necessidades espaciais do programa e ter a capacidade estrutural de transportar o seu peso próprio e o das ações a que está sujeita. Face ao entendimento referido supra, forma estrutural e espaço assumem uma

interdependência absoluta, pelo que, definir um é determinar o outro; a relação é, pois, bijetiva. A conceção estrutural e construtiva é, ou deve ser, algo tão precoce como a definição do espaço e decorre de um processo interativo entre o espaço e a forma; esta tarefa suporta-se na geometria, como disciplina operativa. Conceber uma estrutura é desenhar com a direção das forças, é a arte de dispor a matéria e dar caminho às forças geradas pela gravidade, para criar vão/espaço.

A forma é, pois, o modo como o objeto se “organiza no espaço”, estando “intimamente ligada à estabilidade” e ao seu funcionamento estrutural e, em função da escolha da conformação geométrica, estar-se-á a determinar o respetivo desempenho. A fase qualitativa da conceção estrutural resulta da manipulação geométrica e da forma, daí que, (Ronei Filgueiras apud, Firmo, 2003: 43) afirme que *“quanto maior a riqueza geométrica de uma superfície, tanto mais plenamente serão satisfeitas essas condições”*.

Em função desta contextualização, poderá então dizer-se que a conceção estrutural tem como objetivo apurar uma forma, cujo funcionamento estrutural respetivo gere equilíbrio, em função da tríade “númeno-fenomenológica” Kantiana composta, neste caso por, matéria – forma – peso próprio.

A compreensão fenomenológica desta realidade tem implicações na eficiência estrutural do artefacto arquitetónico, condicionando o seu desempenho, em função da sua utilização durante uma determinada vida útil. E ela é não apenas fenomenológica mas númeno-fenomenológica, pois que o sistema (para o que aqui especificamente interessa, enquanto sistema fechado) faz sempre variar qualquer dos termos em função da variação individual de qualquer dos outros. Repare-se que o resultado das variações pode tornar vários dos resultados equivalentes, mas *nunca* os torna *iguais*.

Este paradigma de conceção estrutural, como já foi defendido, resultar da geometria e da sua manipulação e não do comportamento estrutural do material (tensão de rutura). Procura-se aqui incidir maior pendor analítico na compreensão da geometria e do modo como se distribui o material, i.e., a gravítica da forma.

Uma vez gerada a forma é necessária efetuar um momento de pausa avaliando o seu funcionamento estrutural, assegurando que esta alcança o equilíbrio estrutural desejado. Este momento decorre da compreensão fenomenológica do “caminhar da força” garantindo que as deformações decorrentes do transporte da força são compatíveis com as tipologias estruturais escolhidas.

Este passo é relevante e bem definido no paradigma operativo proposto, sendo marcado por um momento de avaliação, que só pode ser designado por Equilíbrio, até para se necessário se proceder à sua negação. O resultado desta aferição condiciona a continuidade do processo e, caso o resultado não seja adequado, o processo é repetido até que se alcance uma forma equilibrada e viável.

A apreciação efetuada apresenta um carácter qualitativo, e não quantitativo, não recorrendo a modelos analíticos de cálculo. O cálculo não gera a forma, apenas valida o seu comportamento estrutural, no âmbito da resistência dos materiais à tensão de rutura. Este momento de avaliação compromete o projetista a escolher o material, a desenhar o equilíbrio da forma e a escolher as tipologias estruturais capazes de transportar a força.

Este processo conceptual já era utilizado pelos construtores medievais. Apesar de ainda não dominarem o conceito de força, aqueles exploraram de modo intuitivo o equilíbrio tridimensional da forma. Pelo modo como dispunham os materiais, apenas capazes de produzir compressões, formalizavam as tipologias estruturais que lhe permitiam gerar vão sob estas condições de funcionamento estrutural, nos clássicos arcos e abóbadas. Esta lógica conceptual da forma estrutural imperou e só foi alterada com o advento do cálculo analítico das estruturas.

A abordagem estrutural feita pelo cálculo funda-se na relação das tensões com a capacidade do material lhe resistir e, por norma não compreende ou não compreendia o contributo inestimável da geometria e da disposição tridimensional do material para o funcionamento da estrutura e, conseqüentemente para o seu comportamento estrutural. Deste modo, fatalmente se tenderá a limitar as soluções estruturais, isto é, as opções resultantes das tipologias estruturais básicas utilizadas e, por arrasto a espacialidade gerada.

O cálculo das formas estruturais curvas apresenta desafios, com os quais alguns dos diversos intervenientes poderão não estar muito familiarizados, afastando-as por isso, de uma utilização mais presente na arquitetura contemporânea. Os espaços ortogonais como processos de cálculo mais rotinados, gerados por vigas, pórticos e lajes, acabam por ser dominantes, relegando os espaços curvos e mais orgânicos para uma utilização residual.

Esta realidade não tem apenas as conseqüências formais e espaciais, já referidas, tem também conseqüências na eficiência estrutural decorrente do funcionamento da

estrutura, bem como de uma ética e uma estética da forma, que se traduz na maior esbelteza ou elegância (ou Beleza, se a considerarmos como a súpula das virtudes) das peças arquitetónicas e consequentemente aqui incorporando os impactos económicos daí decorrentes.

Esta realidade não tem apenas as consequências formais e espaciais, já referidas, tem também consequências na eficiência estrutural decorrente do funcionamento da estrutura, bem como de uma ética e uma estética da forma, que se traduz na maior esbelteza ou elegância (ou Beleza, se a considerarmos como a súpula das virtudes) das peças arquitetónicas e consequentemente aqui incorporando os impactos económicos daí decorrentes.

As formas planas horizontais produzidas pelas tipologias estruturais como de viga e laje, produzem trabalho Interno Momento Fletor, o que as penaliza fortemente do ponto de vista da eficiência estrutural, por em simultâneo ser necessário trabalho interno Esforço Normal, de compressão e tração. Já as formas curvas com uma geometria adequada funcionam em exclusivo à compressão, daí resultando a estabilidade da sua forma, e do modo como esta é gerida, determinando-se assim a sua viabilidade e eficiência estrutural.

As tensões de compressão produzidas pelas formas estruturais são normalmente muito baixas para as capacidades intrínsecas dos materiais. Esta situação beneficia as formas curvas não só do ponto de vista da quantidade do material utilizado, mas também da conceção.

O equilíbrio demonstrado através da execução de uma maquete ou protótipo permite avaliar a viabilidade estrutural da forma concebida. Este processo de conceção deve ser avaliado como sendo, simultaneamente, extremamente flexível e extremamente fecundo, pois permitiu a sua utilização, com sucesso por projetistas e pensadores da Arquitetura, com origens, enfoques e formações tão diversas, como o arquiteto Felix Candela, o engenheiro Frei Otto ou o mestre de obras Rafael Gustavino, tendo o arquiteto Antoni Gaudí sido o mais notável dos utilizadores desta metodologia conceptual, como a sua obra e os seus modelos demonstram.

A validade deste processo conceptual fica demonstrado, através de um episódio que aqui se conta, sucedido na Universidade Nacional Autónoma do México - UNAM. Com efeito, esta instituição, pioneira na investigação fenómenos físicos, solicitou a Candela através do físico mexicano Sandoval Vallarta, a construção de uma casca de betão,

para alojar o laboratório dos raios cósmicos. Ora, antes do início dos trabalhos e, apesar de o responsável da universidade pela construção ter pedido os cálculos da obra, ao aperceber-se que estes tardariam, em função da complexidade, o arquiteto apresentou algumas páginas escritas, nas quais explicava o quão magnífico o edifício iria ser, bem como todas as suas potencialidades. (Faber, 1963: 14)

O edifício foi realizado em 1951 e ainda hoje apresenta um bom estado de conservação. Fica assim expresso não só o carácter intuitivo e experimentalista da metodologia conceptual de Candela, mas também a sua consistência e solidez.



Figura 8.15 – O processo de construção utilizando cofragens lineares. Betonagem de uma das duas superfícies hiperbólicas.
(Princeton University art Museum, Major work, n.d.)

Como súpula desta linha de pensamento, Dieste elegantemente sintetiza-a assim:

“As virtudes resistentes das estruturas que procuramos dependem de sua forma; é através de sua forma que eles são estáveis, não por causa de um acúmulo desajeitado de material. Não há nada mais nobre e elegante do ponto de vista intelectual do que isso: resistir através da forma”. (Dieste, 1987)

Por sua vez, Rafael Gustavino levou como ninguém ao limite o desempenho da forma,. Como pode facilmente constatar quem estude a sua obra com algum cuidado, as peças de alvenaria resistente sem reforço estrutural, por ele produzidas, revelam uma extraordinária complexidade, assentando o seu processo de conceção no exímio domínio dos processos gráficos de cálculo, leia-se, Estática gráfica, bem como num extraordinário domínio empírico do material e da construção, de que podemos dar como exemplo, a escada da igreja do Cristo Cientista em Nova York.

Para melhor percebermos a questão, aquando da sua da execução e com o objetivo de validar o seu funcionamento estrutural recorreu a testes de carga como é visível nas Fig. 8.16 infra.

O método é de tal modo perfeito no seu empirismo e pressupõe premissas de cálculo tão complexas que, no âmbito do comportamento estrutural da escada, não existe até hoje nenhum modelo analítico que valide o funcionamento estrutural desta peça arquitetónica, sendo que, pelos modelistas matemáticos que procuraram debruçar-se sobre o problema, é apenas adiantada uma “explicação” que aponta para que esta peça funcione como uma “cúpula desenrolada” conforme (cfr. Fig. 8.16 infra). (Block & Rippmann, 2013: 530)

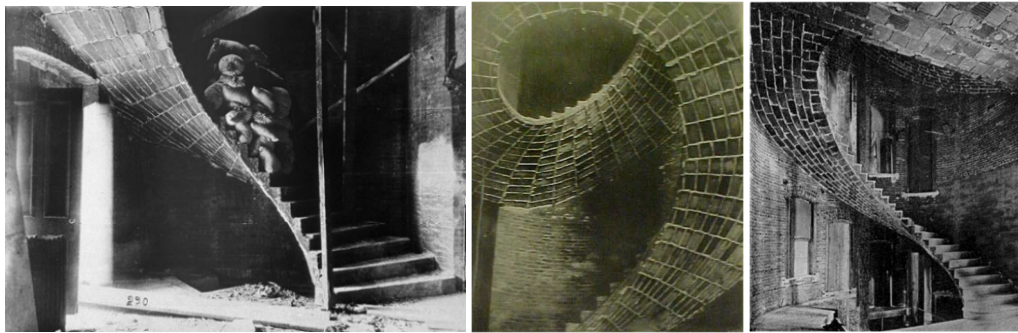


Figura 8.16 – Escadas em espiral e alvenaria resistente realizadas pela Gustavino Campany. Teste de carga com sacos de areia numa escada em construção na igreja do Cristo Cientista, Nova York, 1903, Rafael Gustavino (“Escadas em espiral e alvenaria resistente realizadas pela Gustavino Campany”, n.d.)

O extraordinário domínio estrutural demonstrado por Rafael Gustavino contrasta com a simplicidade do processo, pondo claramente em causa a ideia preconcebida que o domínio da estrutura em particular a sua conceção “é coisa de (cálculo para) engenheiros” pois que, a sua formação profissional é “apenas” de mestre de obras...

Este paradigma conceptual permite aliar uma forte expressão plástica, a um funcionamento estrutural mais eficiente, obtendo-se assim, formas mais esbeltas, com uma espacialidade renovada.

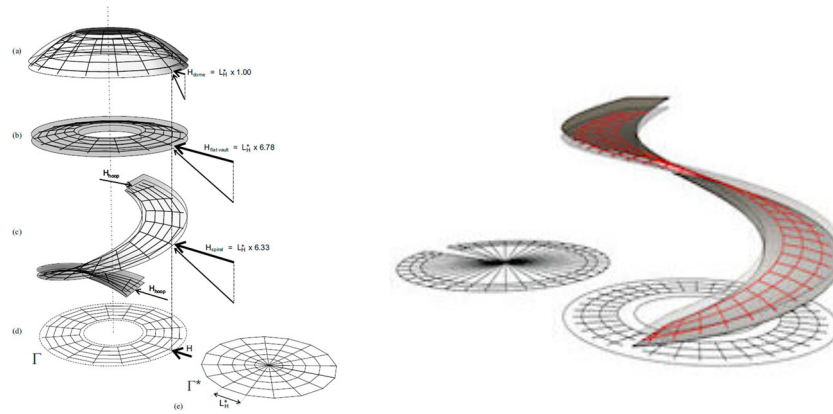


Figura 8.17 – Hipótese de funcionamento estrutural da escada em construção na igreja do Cristo Cientista, Nova York, 1903, Rafael Gustavino
 (“Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches”, 2010)

A grelha operativa proposta confere uma dimensão tecnológica ao processo ideativo, chamando à atenção para a sua relevância e usando todo o seu potencial para a definição, quer de uma expressão formal, quer da significação do artefacto arquitetónico.

O processo de ideação arquitetónica é hoje baseado numa metodologia que, embora sequencial, é executada de forma desarticulada e desfasada no tempo, sendo a consequência dos meios e processos empregues. (Kieran and Timberlake, 2004:84)

As ferramentas e os meios digitais, não só permitem uma integração das diferentes dimensões presentes no processo conceptual, de um modo orgânico, como os processos por elas definidos o exigem, de um modo simultâneo e em tempo-real. Assim torna-se evidente, que pensar na configuração do espaço capaz de responder às necessidades funcionais do programa é ao mesmo tempo conceber a estrutura e o processo tectónico.

A articulação dos diferentes axiomas pretende também pôr cobro à situação gerada pelo atual processo sequencial de conceção e pela deficiente abordagem ao projeto por parte dos arquitetos e engenheiros.

A conceção estrutural é na presente prática da arquitetura, um “no man’s land” ou, se quisermos e em português, terreno de ninguém. O arquiteto por menor familiaridade com a problemática ou, apenas por pressão decorrente do limite de tempo, para o projeto, opta por não refletir a dimensão estrutural existente no ato de projetar e o

engenheiro quando entra no projeto, já este se encontra numa fase de tal modo adiantada que, a sua intervenção acaba coartada por um conjunto de decisões previamente tomadas pelo arquiteto. A isto acresce o seu foco profissional e a sua formação, na qual a geometria e a forma não são os alvos da sua preocupação.

O foco metodológico dos arquitetos e engenheiros, na conceção estrutural pode ser ainda ilustrado pela utilização dos diagramas de momento fletor.

Para análise desta questão, colocou-se abaixo um diagrama, pelo qual melhor poderemos compreender a problemática subjacente. Assim:

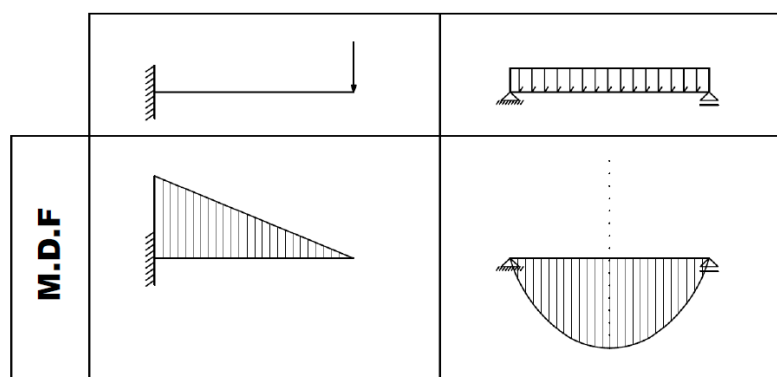


Figura 8.18 – Diagrama de momento fletor
(do autor)

O diagrama do momento fletor (D.M.F.) produzido por uma carga concentrada num encastramento é definido por um triângulo, já uma carga uniformemente distribuída simplesmente apoiada produz uma parábola.

Se para o engenheiro importa saber o momento máximo e a partir daí calcular a tensão, já para o arquiteto este poderia ser uma ferramenta de conceção, pois a sua configuração indicia a deformação da peça, podendo esta informação ser muito útil para o desenho da peça e consequentemente da configuração do espaço.

O foco dado durante a formação resume este diagrama a um exercício de estática, do qual não se consegue extrair qualquer informação, logo sem qualquer utilidade. Sem estudar estas matérias, especificamente não se aprende a estabelecer as relações óbvias entre a configuração do diagrama e as possibilidades de configuração do espaço.



**Figura 8.19 – Cemitério de Igualada, Catalunha, 1994, Enric Miralles (esq)
Parlamento Escocês, Edimburgo, Escócia, 1997, Enric Miralles (dir)**
("Parque del Cementerio de Igualada", n.d.)

Na Fig. 8.19 supra, é possível verificar à esquerda que a consola do muro do cemitério de Igualada apresenta uma forma triangular por analogia com o respetivo diagrama D.M.F. (esquerda). De igual modo a cobertura do parlamento Escocês apresenta a configuração parabólica presente no referido diagrama (direita).

Arquitetos como Norman Foster, Santiago Calatrava, Eric Miralles, Joseph Mias, em inúmeras obras realizam a espacialização do diagrama do momento fletor no seu processo conceptual, pelo que este adquire um carácter tridimensional e, assim, facilmente se compreende que o espaço produzido é consequência deste diagrama. Ou seja, e dito de uma forma prosaica, a parábola que constatamos no edifício do Parlamento escocês é a corporização exata do diagrama do Momento Fletor. A estas questões conceptuais acrescem questões legais, pois que no projeto de um edifício, o papel destinado ao engenheiro civil não é produzir formas. A sua missão é verificar a segurança das formas produzidas mediante a realização do denominado cálculo. Uma vez que quem cria a forma é sempre o arquiteto, pode numa determinada aceção concluir-se haver como que um vazio jurídico nesta matéria. (Morais, 2008)

A problemática subjacente pode tornar-se mais facilmente perceptível mediante outro tipo de aproximação, se atendermos a que na legislação e regulamentação nacional aplicável à profissão, o trabalho do engenheiro é considerado como projeto de especialidade. Preste-se aqui especial atenção ao termo utilizado para designar esta especialidade: *Projeto de estabilidade* do edifício.

Ora, na respetiva memória descritiva e justificativa, o engenheiro refere que o *projeto de especialidade* diz respeito ao *projeto arquitetónico* elaborado por determinado

arquiteto. Ou seja, não escreve, nem utiliza a denominação de *Projeto de Estruturas*. E isto, só pode encontrar justificação no facto de o engenheiro efetivamente não realizar o projeto *da estrutura*. Com efeito, não é ele quem concebe a *forma* dessa estrutura, ele somente a *calcula*. É por assim ser que é este o modo usual de (d)escrever e apresentar a memória descritiva, passe o pleonismo, de acordo com a realidade metodológica e profissional de Projeto de um edifício em Portugal.

O engenheiro limita-se deste modo a fazer os cálculos justificativos da segurança de uma determinada *forma estrutural*, da qual não é ele o criador efetivo, limitando-se como se disse a calculá-la. Sobre esta temática é curioso atentar na designação dada ao engenheiro de estruturas no Brasil e que está muito mais em sintonia com a terminologia portuguesa antiga; eles são muito apropriadamente designados por “*calculistas*”.

Noutro plano, é essencial aqui referir-se existir neste processo uma questão que se prende com a dimensão ética, a saber, a da verdade material do direito de autor.

Atente-se no seguinte exemplo. De quem é a autoria da famosa (e assim, comumente referida) *pala* do Arquiteto galardoado com o importante prémio Pritzker, Siza Vieira, localizada na área da antiga EXPO?

A literatura que documenta o desenvolvimento do projeto, revela a importância do aporte da engenharia à conceção da referida solução, sendo que, deve reconhecer-se, muitas das soluções formais só poderem ter sido criadas com uma interação direta com o engenheiro, contudo, este não só veio fornecer a dimensão gravítica ao *traço* ideativo de Siza, como determinou formalmente o edifício, pelo que, poderá ser legítima a questão de a obra ser ou não da autoria do engenheiro? Pelas descrições, a autoria parece dever ser no mínimo compartilhada, pelo menos em parte, uma vez que a intervenção do engenheiro parece poder ter sido pelo menos parcialmente determinante para a forma final.

Em sùmula, no processo de conceção arquitetónica existe a necessidade de articular a vertente estrutural com o espaço, sendo a respetiva relação mapeada na grelha operativa referida, através da passagem da geometria para a forma. Esta torna-se consequentemente e por isso mesmo, fator determinante no modo de entender e desenhar a estrutura, ao assegurar essa (maior) articulação entre a forma (estrutural) e o espaço, deste modo conferindo-se uma maior consistência ao processo conceptual.

8.8 Fase C

8.8.1 Envelope construtivo

A caracterização material da forma determina uma tectónica que resulta da sua implementação construtiva. Deste modo, o ciclo construtivo que advém da escolha do material e dos processos de construção permite-nos chegar ao conceito aqui designado de envelope construtivo. E, mediante este passo metodológico, à definição material acrescerá a definição do processo construtivo, aspeto que se revela substancial e processualmente determinante para que a viabilidade do projeto seja assegurada.

Aceitando a anterior premissa, pode então dizer-se que as implicações construtivas condicionam a realização do artefacto arquitetónico no tempo de execução, nos custos, na complexidade das infraestruturas necessárias à sua construção.

. A incorporação desta premissa no ato de conceção numa fase inicial do projeto permite adequar a escolha do sistema construtivo em função da forma, sendo possível efetuar os ajustes necessários, quer na forma quer no processo construtivo, com vista à otimização do todo construtivo.



Figura 8.20 – Maqueta da opera produzida por Utzon do projeto inicial das cascas
 (“Maqueta da opera produzida por Utzon do projeto inicial das cascas”, n.d.)

A importância de todo este processo dialético fica expressa e pode ser fundamentada se atendermos ao processo de conceção e construção da Opera de Sydney. Esta peça, saída de um gesto do arquiteto Utzon, contrapõe o fulgor criativo às implicações construtivas que este gesto pleno de inovação pressupunha, ao nível do conhecimento e saber individual.

As cascas, que no projeto inicial resultavam de um conjunto de superfícies parabólicas, sofreram várias transformações, passando por esquemas elípticos e anéis circulares. A ideia inicial para a forma colocava problemas de execução. Faltou no entanto

conhecimento sobre as tipologias das formas estruturais básicas, bem como a interligação entre os sistemas estruturais e os sistemas construtivos.

A dimensão da cobertura da Ópera de Sydney exigia uma gestão específica da forma, com conhecimento específico, que permitisse interrelacionar, no *Projeto*, a forma estrutural, o processo construtivo baseado na pré-fabricação e o expressionismo formal, como modo de viabilizar esta forma estrutural.

A evolução da *forma* das coberturas ao longo do *Projeto* pode ser percebida através dos desenhos das várias fases evolutivas. Num primeiro momento do projeto, as cascas foram modeladas como superfícies parabólicas, o que colocava dificuldades no processo construtivo, pelo facto da curvatura não se manter constante, revelando-se difícil a sua construção com recurso à pré-fabricação, dado que as peças para formalizar a forma apresentavam variações geométricas ao longo da superfície.

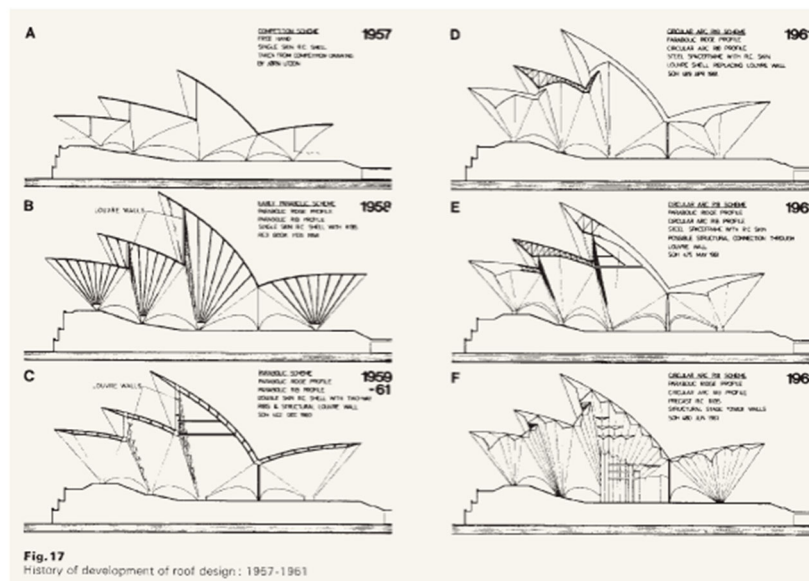


Figura 8.21 – Evolução geométrica da casca 1957 - 1963

(“Opera House en Sydney. Control gráfico de formas y superficies de transición. La forma de las costillas del intrados.”, 2010)

O processo construtivo e a manipulação geométrica da *forma* foram cruciais para a materialização da peça. A forma estrutural integra a forma global do edifício e, ambas, foram criadas com o pressuposto de viabilizar e atender ao processo construtivo e produtivo. A adoção da pré-fabricação, como elemento base do ciclo construtivo,

implicou não só a gestão da capacidade dos sistemas de fabricação, como também dos sistemas de movimentação, elevação e montagem.

Face à complexidade formal da superfície, também o cálculo se revelou problemático, inclusive tendo sido testado em laboratório um modelo à escala reduzida, para afinação da geometria da *forma estrutural*. Como resulta óbvio, este ensaio em laboratório decorreu mais ou menos linearmente da incapacidade dos modelos de cálculo então disponíveis para simularem com acuidade suficiente a forma estrutural ideada para criação.

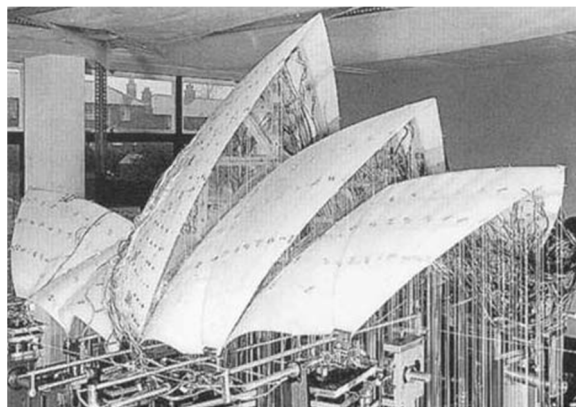


Figura 8.22 – Maqueta de teste das primeiras versões da casca de betão
(Control gráfico de formas y superficies de transición, Opera House en Sidney, 2010)

Os meios digitais assumiram aqui um papel relevante no processo, conferindo, como disse Sousa, ao computador o “papel de uma máquina de cálculo” (Sousa, 2010: 27). Os complexos cálculos estruturais, decorrentes das seções esféricas do projeto, levaram Ove Arup e o seu sócio Jack Zunz a concluir que estas formas “*não poderiam ter sido construídas sem a utilização de computadores. Nós não poderíamos ter produzido” nem ... “a quantidade de informação, nem a qualidade do ... “trabalho analítico, necessário para erguer o edifício no tempo disponível”*”. (Sousa, 2010: 28)

Os problemas de cálculo residiam igualmente na reduzida capacidade do modelo informático utilizado, naqueles tempos, o que obrigava os engenheiros a simplificar em demasia os modelos de cálculo, face à real complexidade geométrica das superfícies projetadas. O modelo de cálculo usado, então, não era compatível com o real *caminhar da força*, no interior do volume gerado pelas superfícies curvas, pois impunha, com

aquela simplificação no modelo de cálculo, que a espessura necessária fosse de valor apreciável, incompatível com o custo e a plástica desejada. O real *caminho* seguido pela *força* nas cascas da Ópera de Sidney são superfícies parabólicas que resultam da manipulação das seções esféricas; Dessa forma, descreve acutilantemente Moraes, o modelo analítico usado não correspondia ao real *caminho da força* no interior da casca.

Após a paragem do projeto, optaram então por introduzir alteração suficiente na forma, ajustando-a ao caminhar das forças, através das seções esféricas inclinadas, com espessura, que naturalmente definem o interior das cascas e que podemos aqui sintetizar de forma redutora, no funcionamento estrutural da casca, situação que perceber -se pela análise da figura que se segue.



Figura 8.23 – Princípio geométricos da casca Ópera de Sidney 1957 – 1963
 (“Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution”, 2002)

A geometria das cascas foi no plano concetual obtida, partindo da esfera, mediante a retirada de calotes, e estas, uma vez rodadas, acabam por definir as cascas do edifício da Ópera, acabando deste modo o funcionamento estrutural por não decorrer da superfície esférica. Quando rodada, a calote esférica, colocada na vertical, forma um arco em ogiva, com um funcionamento estrutural correspondente à *tipologia da forma estrutural básica de um arco em ogival*.

Deste modo, a sistematização das *formas* a partir de um raio constante, potenciou a construção pré-fabricada ou, dito de outra forma, permitiu que as cascas fossem fragmentos da mesma esfera, com um raio de 246 pés (75 metros).

Através deste “novo” enfoque foi então possível eliminar o carácter irregular das soluções construtivas, limitando-se a problemática construtiva em regra associada ao processo da edificação destas formas. Resultou assim que o estudo do processo construtivo na

fase de *projeto* condicionou o desenvolvimento e a forma com que este foi depois proposto, no lugar que tradicionalmente lhe caberia.

A racionalidade inerente à conceção do ciclo construtivo nestes moldes é expressa no facto de as 1498 peças que formam as vigas do intradorso terem sido produzidas a partir de, somente, 12 moldes! Tal, só foi possível, graças à geometria da forma ter sido *estudada* na fase de *projeto*.

A complexidade formal do edifício necessitou como não podia deixar de ser de uma abordagem tectónica consistente. Deste modo, foi definida uma estratégia de produção, que passou por dividir em partes iguais e com curvatura constante as superfícies e, assim o talhe da peça, ter apenas de apurar a dimensão, uma vez a geometria ser a mesma. Os componentes puderam, então, ser produzidos de modo industrial, permitindo recorrer a um processo de *assemblagem* simples e rápido das diversas partes.

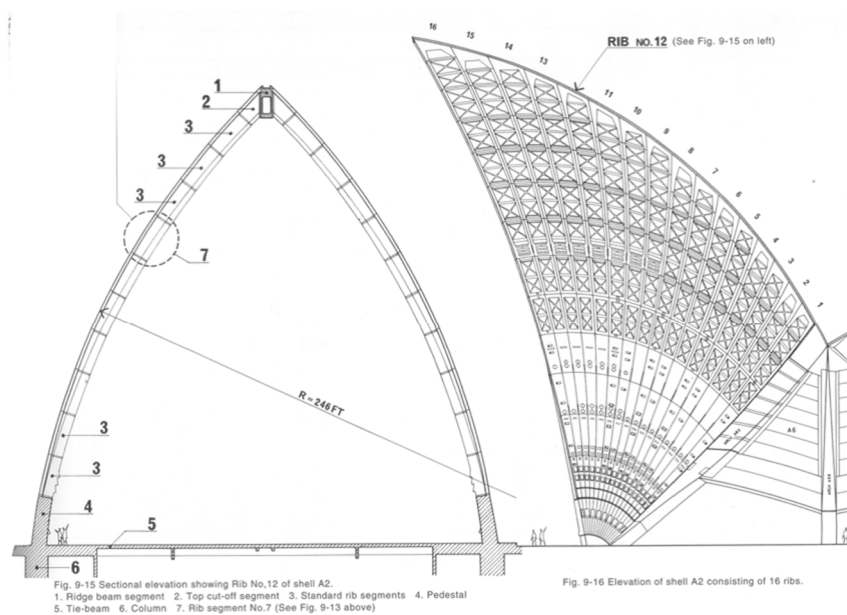


Figura 8.24 – Configuração da seção transversal Opera de
 (“Opera House en Sydney. Control gráfico de formas y superficies de transición. La forma de las costillas del intrados.” 2010)

O sistema criado expressa uma hierarquia, conforme pode ser percebido através da Fig. 8.25, infra, sendo consequentemente as cascas divididas em costelas e estas em elementos menores, os quais, assemblados, formam a superfície de dupla curvatura. A

lógica construtiva gera deste modo, também harmonia e uniformidade dimensionais, conferindo-se, assim, continuidade e unicidade ao edifício.

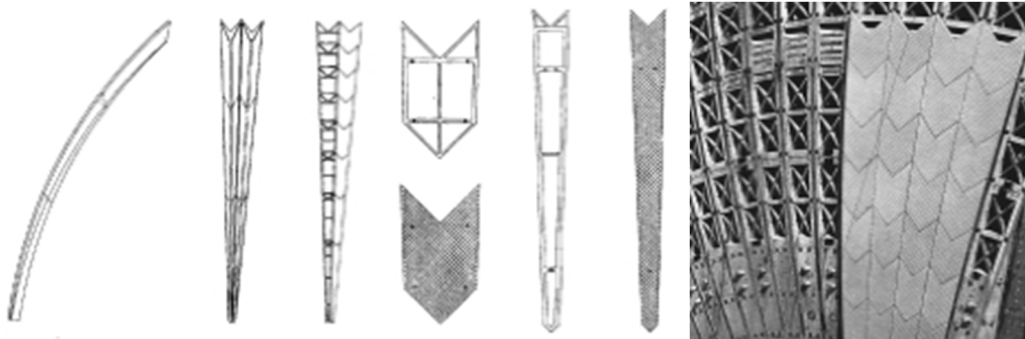


Figura 8.25 – Elementos esferoidais pré-fabricados das abóbadas, Jørn Utzon,
 (“Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution”, 2002)

Aceitando o processo intelectual explicativo, enunciado supra, pode pois, concluir-se, que, “*definição geométrica da forma abre claramente a possibilidade de produzir todos os componentes através da produção em massa*”. (Cabillo, 2010: 140)

Com efeito, a produção em série, permitiu uma construção sem o recurso a andaimes e cofragens de complexo desenvolvimento e custo elevados. Os componentes podem ser fabricados em série e posteriormente montados como um puzzle tridimensional; consegue-se uma solução económica, com expressividade plástica, e, por acréscimo, de fácil manutenção.

O recobrimento do cavername (costelas construtivas) com painéis pré-moldados, permite que a *forma estrutural* defina em si mesmo a *forma arquitetónica*. Esta coincidência, de conceção e pensamento, nem chega a ser nova, pois encontra-se presente, (obviamente que de forma apenas pressuposta e não cognoscente) de igual modo já nas catedrais góticas.



Figura 8.26 – Construção das abóbadas, Ópera de Sidney
 (“Sydney Opera House Utzon Design Principles Presentation 2002 model of spherical solution”, 2002)

Abre-se aqui, como que um parêntesis para afirmar que este exemplo, embora tenha por um lado, toda a esta carga negativa de desadequação entre a via projetada, o respetivo estrutural e a solução contrutiva embrionária, ilustra bem a necessidade (de que aliás o arquiteto posteriormente se deu conta) de ter em conta na ideação projetual a tecnologia da construção, ou da tectónica da forma, se se preferir, como forma de compatibilizar a forma otimizada com a forma construída ou a construir.

Pensa-se que esta via de *elaborar o projeto* parece ser deveras *promissora*, com inúmeras potencialidades devendo ser explorada, não só na prática profissional como, inclusive, no interior da escola, concretamente na lecionação da disciplina de *Projeto*.

Trata-se da *metodologia de projeto* defendida nesta dissertação, como o processo a implementar no campo da Arquitetura e na profissão do Arquiteto, já que potencia a criatividade *cognitiva* deste, como cultor, pensador, projetista e cientista.

Retomando a linha de raciocínio em questão, percebe-se então agora que só foi possível concretizar o *projeto* da Ópera de Sydney quando a forma estrutural foi capaz de se compatibilizar com um modo de construir, e esta é uma conclusão e não uma premissa pois, só quando se tornou perceptível que o projeto original apresentava esta lacuna conceptual (e que colocou em risco a sua realização) é que foi possível reverter o *modus pensandi* e, consequentemente preencher a lacuna e, nesse vazio, agora preenchido, idear a solução, como antes se tinha ideado o resultado, utilizando por sua vez um novo *modus operandi*.

Pode assim, dizer-se que, com vista a evitar os conflitos entre a otimização do funcionamento estrutural e o ciclo construtivo adotado, o paradigma proposto tem de estabelecer necessariamente um momento de avaliação do envelope construtivo. Esta reflexão consciencializa o autor das implicações construtivas decorrentes da forma concebida.

Num pequeno aparte, percebe-se, pois, que as superfícies curvas e de dupla curvatura como que apresentam um contraste inverso entre a sua eficiência estrutural⁴³ e a respetiva dificuldade construtiva, sendo o ciclo construtivo e o sistema construtivo decisivos para a sua implementação.

8.8.2 Validação estrutural

O “*contínuo digital*” tem por base a interligação das várias fases de projeto através das ferramentas digitais. A grelha operativa preconizada articula a conceção estrutural com a análise estrutural, sendo que no caso presente, para formas e superfícies curvas recorre à utilização de um *plug-in* designado RhinoVAULT. Esta configuração, não só tira proveito dos processos disponibilizados pelos meios digitais, como nele vê consubstanciados os princípios metodológicos expressos, entre outros, por Mario Salvadori.

“Existem poucas dúvidas quer na mente dos engenheiros quer na mente dos arquitetos de que os modernos conceitos estruturais são usados de maneira adequada, somente quando o arquiteto possui uma compreensão exata das estruturas. Isto não significa que todos os arquitetos se devam tornar matemáticos; sugere-se simplesmente àqueles que desejam expressar através de formas estruturais” ... que ... “devem capacitar-se para usar ferramentas de análise quantitativa. Assim serão surpreendidos ao descobrirem, mais adiante, que a sua intuição cultivada chegará frequentemente a soluções estruturais “corretas”, sem muita articulação matemática”. (Salvadori, 1994:253)

⁴³ Para o efeito aqui pretendido, pode dizer-se consistir a eficiência estrutural a razão entre o peso próprio e a carga total que suporta

A utilização do software Rhino e do *plug-in* RhinoVAULT, permite que uma ligação entre conceção e análise seja feita de um modo automático, no sentido de bijetivo, através de processos digitais que interligam os meios de modelação e manipulação geométrica, com os meios de análise estrutural. A análise é feita em simultâneo pelo software e a informação é disponibilizada em tempo-real, o que permite manipular de modo interativo a forma e o seu funcionamento, em função do seu comportamento estrutural, através de um controlo visual.

Os processos interativos disponibilizados pelas ferramentas digitais, constituem-se num quadro instrumental, que só por si, porém, não asseguram a conceção das estruturas e a sua consistência estrutural. A solidez das soluções decorre de uma forte compreensão e conhecimento do funcionamento estrutural, se se quiser da fenomenologia estrutural, uma vez que esta é fundamental para a manipulação da forma e para a conceção das estruturas.

As ferramentas digitais e as suas possibilidades, sem conhecimento associado, de pouco valem, pois como não nos cansamos de repetir, o cálculo apenas valida a forma, não a concebe. Conscientes desta realidade o grupo de investigação Block Research Group – BRG tem vindo a desenvolver software que visa dotar o arquiteto de uma consciência do funcionamento estrutural da forma, leia-se aqui, conceção estrutural, tendo também presente e interligado o comportamento estrutural, e leia-se aqui, cálculo.

Neste âmbito o BRG desenvolveu para a disciplina de projeto estrutural, o *plug-in* eQUILIBRIUM. Esta plataforma permite a aprendizagem da fenomenologia estrutural, baseada numa abordagem gráfica, o que torna mais fácil a compreensão das estruturas e da sua manipulação.

O RhinoVAULT é outro software desenvolvido pelo BRG, o qual usa diagramas de análise recíproca, gerando um método de análise interativo, rápido e intuitivo. Este, ao mesmo tempo que possibilita facilidade de leitura da estática gráfica, oferecendo conjuntamente uma visão fiável e global do comportamento tridimensional das peças.

O processo de cálculo adotado por este software escapa no entanto aos modelos de cálculo convencionais, que abordam a forma através de uma simplificação bidimensional. O RhinoVAULT com base numa malha que define a superfície do objeto, calcula tridimensionalmente o objeto, com recurso à estática gráfica. (Block and Ochsendorf, 2007: 167-173)

O objetivo deste software é criar um interface compreensível para os utilizadores, de modo a que estes possam gerar formas de grande expressividade, incorporando ao mesmo tempo os princípios estruturais subjacentes às *formas estruturais*.

Com este tipo de softwares Philippe Block pretende que “*a discussão estrutural se faça diretamente e a um nível superior,*” (BRG, s.d) dotando os arquitetos de ferramentas capazes validar as suas conceções e ao mesmo tempo, aumentar o seu conhecimento e intuição.

Block facilita o processo de conceção estrutural, por via de um diálogo mais sólido, informado e consciente entre os diversos agentes, aumentando assim em muito a exigência e o nível de quem participa no processo de conceção e calculo estrutural e consequentemente da excelência das soluções produzidas.

Este plug-*in* gerou alguns detratores do seu trabalho em que, segundo estes, o software por ele desenvolvido poderia tornar a profissão de engenheiro obsoleta. Block responde que o engenheiro não é posto em causa, este sistema apenas vem capacitar os arquitetos para que “*a conceção estrutural se faça e a um nível superior*” e, logo, a análise do engenheiro, também.

O trabalho produzido por Philippe Block é ainda notável pelos princípios que transporta conferindo uma dimensão ética à estética das suas formas estruturais ou, como o próprio afirma “aquilo que demonstramos com a nossa pesquisa é que a liberdade formal não equivale a um desperdício de material”. (BRG, n.d); pelo contrário, diríamos nós.

A manipulação da forma visando a equilíbrio direto nas estruturas permite formas estruturais conceptualmente solidas, mais otimizadas e mais expressivas.(Morais, 1997: 80)

8.8.3 Tessellation / paginação da forma

Com base nos resultados da pesquisa formal e no funcionamento estrutural, torna-se necessário apurar a paginação das peças cerâmicas, uma vez que a sua disposição é essencial para um bom funcionamento estrutural. Em função do funcionamento tridimensional da *forma estrutural*, ou seja, do fluxo da força, (inferida pela rede de impulso (TNA) – (RhinoVAULT) as peças devem ser dispostas

perpendicularmente à força, assegurando-se deste modo que a compressão gerada nas juntas de trabalho estabilizam a forma.

A paginação da forma deve por isso evitar colocar as juntas de trabalho das peças cerâmicas paralelas ao fluxo da força esta disposição, pois, compreensivelmente, tal irá gerar deslizamentos das peças e a consequente instabilidade da forma. Ao mesmo tempo, a disposição das peças ao longo da forma (a referida paginação) interliga-as, assim permitindo o funcionamento tridimensional da mesma.

A tarefa de articular o formato das peças cerâmicas com a forma estrutural tem a preciosa ajuda do software já disponível, com o qual é possível lidar com este processo, por vezes difícil de controlar. Através de critérios que interligam as peças, a forma e o funcionamento estrutural, foi desenvolvido um esquema de otimização, que simplifica o ajuste da paginação apropriada para as abóbadas de forma livre, designado por *tesselation*.

Estas ferramentas digitais, permitem um processo de conceção interativo, flexível e orientado pelo utilizador, regulado e monitorizado automaticamente, para além de que atua em tempo real.

Não obstante este processo semiautomático, o arquiteto deve verificar os padrões de paginação das peças cerâmicas, de modo a garantir um funcionamento estrutural eficaz da forma. Em caso desta condição não se estabelecer, o processo deve ser repetido (empiricamente se necessário) de modo a alcançar o padrão ajustado ao funcionamento da forma.

8.9 Fase D

8.9.1 Forma construtiva

A arquitetura é uma atividade, que encerra no seu exercício um conjunto de ciclos que a corporizam e sem os quais não se cumpre enquanto disciplina.

O momento em que o projeto ascende à condição de arquitetura, é o momento em que as ideias traduzidas pelo desenho, se consubstanciam materialmente. Este momento é crucial e dá-se com a construção. O pensar é acrescido pelo construir, gerando o *Habitar*, razão da primordial da peça arquitetónica. Daqui resulta claro que o ciclo

construtivo é decisivo para a arquitetura, os seus meios e processos condicionam o ato de pensar arquitetura.

Pensar, sem fundamentar uma materialização, é investigar, é especular no âmbito da arquitetura. Fazer Arquitetura é saber pensar e saber materializar; envolve método, conhecimento e criatividade. É uma relação de dependência mútua, em que a construção e os seus processos informam a conceção.

A forma construtiva é consequência do envelope construtivo, uma vez que resulta da definição de um ciclo de construção/produção para a sua implantação material. Neste estágio, de maior maturação e definição do projeto, são apuradas e escolhidas estratégias de construção, bem como as tecnologias adotadas para implantar o envelope construtivo. Este definiu numa fase embrionária o material, balizando desde logo esta escolha o leque de processos construtivos, contudo, existe um espectro de indefinição que a forma construtiva vem colmatar, acrescentando definição e adequação às soluções tectónicas.

Assim, a forma construtiva aprofunda as opções tomadas na fase anterior, já que o foco desta etapa é ajustar, o material, a tecnologia e o ciclo de produção da forma estrutural, parcialmente ideadas e concebidas anteriormente.

Neste momento da metodologia são equacionados os recursos tecnológicos disponíveis, a cultura construtiva, os parceiros de obra, o enquadramento jurídico, os recursos financeiros, o tempo de execução, custo de produção, custo de manutenção, em súmula, as diferentes variantes que um mesmo processo de construção possa ter e as respectivas implicações e interligações.

A escolha do processo tecnológico do seu ciclo de construção, reveste-se de particular importância na viabilização da obra, tendo implicações no tempo de construção e nos custos. Esta escolha deve ainda atender à cultura construtiva e ao índice tecnológico disponível.

Esta realidade pode ser ilustrada pelo Centro Cultural Heydar Aliyev – Zaha Hadid (1950-2016) bem como pelo Palácio dos Desportos – Pier Luigi Nervi (1891-1979), em que ambos adotaram um processo de construção que recorre a módulos de betão pré-fabricado, mas em que, no entanto, a sua implementação apresenta diferentes processos, com profundas diferenças.



Figura 8.27 – Elementos construtivos do Centro Cultural Heydar Aliyev, Baku, Azerbaijão, 2007, Zaha Hadid
(“Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects” 2013)

Segundo Winterstetter, na estrutura principal do Centro Cultural Heydar Aliyev, o respetivo núcleo central é constituído por betão, estrutura metálica e lajes colaborantes, constituindo a fachada um sistema reticulado, definido por treliças espaciais, compostas estas por um sistema de tubos e nós de aço especial, o qual foi produzido pela MERO – TSK International.

Esta estrutura é por sua vez recoberta por painéis de betão reforçado com fibras, concretamente, a GFRC Glass fiber reinforced concrete e GFRP Glass fiber reinforced plastic.

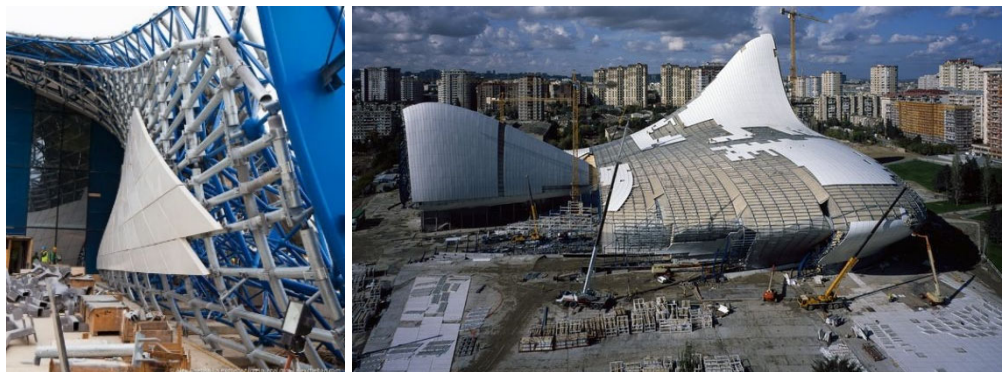


Figura 8.28 – Camadas construtivas do Heydar Aliyev Center
(Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects, 2013)

Os painéis são constituídos por várias camadas de betão, formado com cimento branco de alto desempenho composto por inertes com uma granulometria fina, camadas essas reforçadas com malhas de fibra de vidro, o que permite lidar com um material muito durável e resistente, passível de ser moldado em painéis, mas com apenas alguns milímetros, uma vez que tal decorre da espessura da armadura.

Os painéis são modelados de modo individualizado, para formarem a superfície curva, recorrendo esta construção de carácter ligeiro a perfis 2D e a peças de poliestireno expandido 3D cortados por CNC para formalizar os moldes. (Winterstetter, 2011)

Werner Sobek foi o responsável por toda a informação necessária para a produção dos painéis externos, sendo aqui de notar que a referida superfície é constituída por cerca de 15.000 painéis, cada um com uma geometria curva individual, em tamanhos até um máximo de 1,5 m de largura e 7m de comprimento, *nenhum igual a outro*. Existem 40 mil metros de tubos de subestrutura metálicos, em que, também nenhum tubo é igual a outro.

Os painéis são produzidos em oficina, sendo depois enviados para o local e instalados pelos trabalhadores locais. Cada painel é levantado por guindaste e depois colocado manualmente (o que só é possível devido à ligeireza do produto). Os painéis são aparafusados nas conexões de uma subestrutura metálica instalada anteriormente.

Thomas Winterstetter alerta para a dificuldade de implementar um projeto, cuja opção construtiva passa por uma solução de alta tecnologia, num contexto em que a cultura construtiva se baseia em soluções com um baixo índice de tecnologia incorporado “*é difícil, em geral, construir algo tão extraordinário em um país remoto, onde mesmo ferramentas básicas às vezes podem*” ... *ter de ... “ser importadas”*. Percebe-se, portanto, que esta indústria está a tornar-se mais complexa a cada dia que passa, daí que o contexto tecnológico muitas vezes traga mais valia a esta realidade, em de, como tradicionalmente, a seguir.

Embora a arquitetura sempre se tenha esforçado para expressar e explorar os limites da prática de engenharia, estes limites têm vindo a ser alargados e redefinidos muito rapidamente.

Thomas Winterstette e Werner Sobek (2011) no tocante à estrutura, revelam-nos que é uma boa prática fazer cálculos estruturais para projetos desse tipo com base na análise de elementos finitos não-lineares 3D, incluindo cargas especiais, como as que encontraríamos em situações de terremoto, ou altas cargas de vento como as presentes em Baku. Revelam ainda que “*fizemos os cálculos com dois programas de elementos finitos 3D*” ... *completamente ... “separados, para comparar os resultados e não confiar em um único”*.

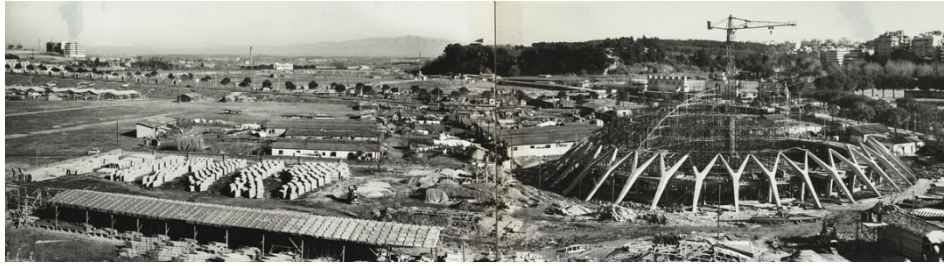


Figura 8.29 – Estaleiro pavilhão dos desportos, Roma, Itália, 1960 Pier Luigi Nervi
(Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi, n.d.)

Nervi, por seu lado, utiliza também módulos de betão pré-fabricado, contudo aqui o ciclo de produção é diferente, pois o sistema proposto procura conciliar economia e rapidez, ao eliminar a utilização de moldes de madeira não reutilizável na fabricação das peças de betão armado, obtendo assim uma redução de custos com os materiais e a redução da espessura dos elementos resistentes (peso próprio).

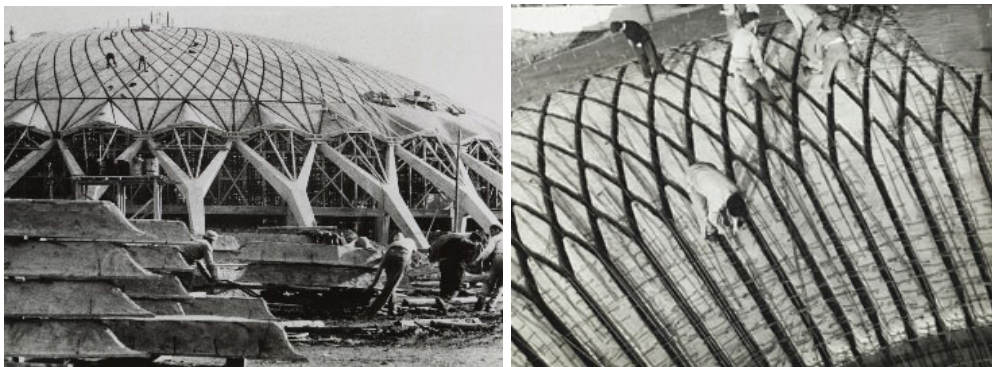


Figura 8.30 – Ciclo construtivo pavilhão dos desportos, Roma, Itália, 1960 Pier Luigi Nervi
(Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi, n.d.)

O processo de construção divide o estaleiro de obra em dois setores autônomos, onde os trabalhadores podem trabalhar em paralelo: num dos lados do estaleiro são realizadas as escavações, feitas as fundações, para no outro lado serem moldados os pilares e todas as peças que compõem a superfície.

As peças romboidais têm pouco peso bastando um andaime de metal para as suportar, sendo para o efeito colocadas tábuas entre elas que funcionam como uma cofragem perdida; deste modo os canais assim gerados permitem uma betonagem que consolida e unifica todas as peças.

O molde de “ferrocimento” é leve, moldável e barato, podendo gerar elementos pré-fabricados no chão, muito rapidamente. Nervi recorre a uma estratégia definida por uma hierarquia de matrizes a que designa de “avó, mãe, filha” através das quais define os moldes necessários para formar a superfície. O molde de madeira é geometricamente idêntico ao espaço interno das nervuras da casca esférica, tendo sido criados 13 moldes.

As equipas de betonagem podem produzir até 30 peças por dia, sendo que ao mesmo tempo na outra parte do estaleiro está a ser montada a infraestrutura que irá suportar estas peças durante a montagem da superfície.

Ao longo da sua carreira Pier Luigi Nervi registou cerca de 40 patentes, com base na ideia de dividir as grandes estruturas de betão armado, em pequenos pedaços pré-fabricados em estaleiro, montados e consolidados *in situ* com jatos de cimento de alta resistência nas juntas.

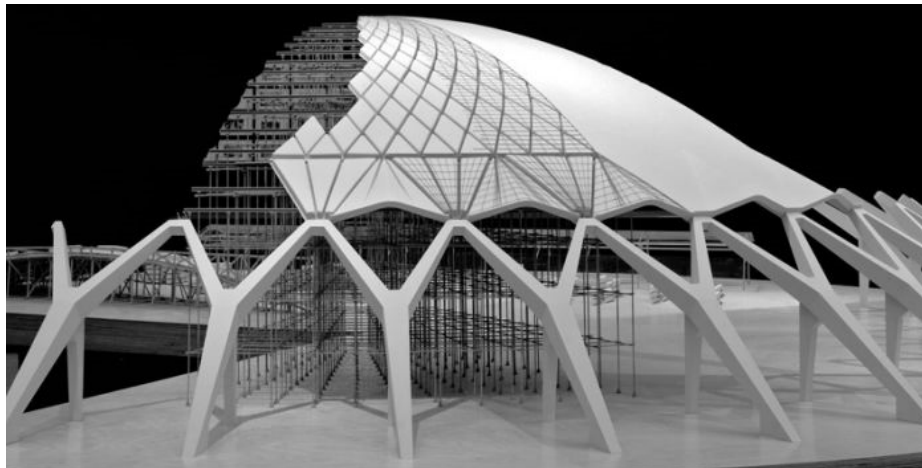


Figura 8.31 – Processo construtivo do pavilhão dos desportos
(Concorso nazionale per le scuole ispirato alla figura e all'opera di Pier Luigi Nervi, n.d.)

Nervi inventa uma solução na qual modifica as proporções entre o cimento e o reforço. Ele predispõe várias camadas de redes finas de metal, quase "do galinheiro", e depois espalha sobre elas um conglomerado de betão de alta resistência, obtendo placas de 2-3 cm de espessura. O novo material revela-se muito resistente, elástico, dúctil, isotrópico, praticamente homogêneo, leve e extraordinariamente moldável em qualquer forma e acima de tudo, *excecionalmente barato*.

A descrição feita dos dois projetos permite constatar as profundas diferenças existentes entre os dois processos, as quais traduzindo diferentes níveis de complexidade e índice tecnológico põem em evidência as decisões ao nível do ciclo de construção, relevantes para a implementação da obra, ao nível dos mais variados aspetos, como a estimativa de custos, tempos de realização, todos estes como se depreenderá, determinantes para a viabilização do projeto.

O ciclo de construção definido pode apresentar também impactos não facilmente mensuráveis, com um carácter social ou ideológico. Neste âmbito podemos incluir alguns projetos que pretendem utilizar a construção do artefacto arquitetónico, como um momento de regeneração social.

Estes projetos incluem na sua génese conceptual e no modo como é concebido o ciclo construtivo, a oportunidade de transferir competências profissionais aos habitantes, visando a respetiva qualificação socio-profissional e procurando conferir-lhes por essa via um diferente patamar socio- económico. O mesmo acontece com os aspetos ideológicos relacionados com o carbono ou com a energia incorporada na construção.

O projeto do Centro Interpretativo do Parque Nacional de Mapungubwe, permite ilustrar um projeto feito com o objetivo de requalificação da população. Os ladrilhos cerâmicos normalmente utilizados para a construção de abóbadas, foram trocados por blocos de terra compactados – BTC, estabilizados com uma baixa percentagem de ligante.

O edifício utiliza na sua construção mais de 200 mil BTC para cobrir uma área de mais de 3000 m². Os blocos de solo-cimento são fabricados localmente, o que permitiu aumentar a sua durabilidade, mas também ativar a economia local, acrescentando novas competências às forças de trabalho locais.⁴⁴

⁴⁴ Cf. Ramage, M.H. et al. (2010) "Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa.", *ATSF Journal* 7(1/2): 14-23; Ramage, M.H. et al. (2010)



Figura 8.32 – Construção Centro Interpretativo do Parque Nacional de Mapungubwe, África do Sul, 2010, arq. Peter Rich; responsável técnico: John Ochsendorf, Michael Ramage

(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2010)

O baixo índice tecnológico necessário para a produção deste tipo de construção revelou uma particular adequação ao contexto, sendo digno de referência os impactos mínimos que a transferência tecnológica acarretou.

O recurso à técnica de construção utilizado pelas Abóbadas Gustavianas possibilitou construir-se sem cofragens e com um mínimo de desperdício. A sua construção não necessita de um aparato significativo a nível de infraestruturas de construção, apenas foi necessário assegurar a construção de nervuras de suporte e guias de referência.



Figura 8. 33 – Construção Centro Interpretativo do Parque Nacional de Mapungubwe, África do Sul, 2010, arq. Peter Rich; responsável técnico: John Ochsendorf, Michael Ramage

(“Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design”, 2010)

“Sustainable Shells: New African vaults built with soil-cement tiles”, *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures*, 51(4): 255-261.

O projeto SUDU – unidade habitacional sustentável, Etiópia, 2010, Block Research Group, teve com premissa projetual o baixo índice tecnológico e constituir-se como uma oportunidade para qualificar a população local.

A técnica utilizada para a construção, apesar de ter sido corrente durante milhares de anos, nos dias de hoje caiu em esquecimento, não existindo mão-de-obra capaz de assegurar a construção destas peças arquitetónicas.

Esta realidade foi uma das condicionantes, que o ciclo de construção teve de enfrentar. Os gestores de projeto organizaram cursos de formação, para capacitar de um modo rápido a mão-de-obra local, para a realização de formas curvas.



Figura 8.34 – Formação profissional, da população local
("Building Ethiopia, sustainability and innovation in architecture and design", 2010)

O desenho do ciclo construtivo tem que atentar sobre um vasto espectro de aspetos conceptuais (designados por axiomas operativos, na metodologia proposta) dependendo a sua eficiência da articulação dos vários meios disponíveis e da sua adequação a um determinado contexto físico e financeiro.

Uma vez que o ciclo construtivo resulta das condições produtivas, uma perspetiva historicista revela-nos que, através da evolução dos meios de produção e das suas

possibilidades na materialização da arquitetura, poderemos considerar três condições de produção; Manual; Mecânica; Digital⁴⁵, sendo que o desenho do ciclo construtivo se pode suportar numa ou mais destas condições.

A análise feita por Kolarevic ao “papel do arquiteto ao longo da história da construção”, naquilo a que designa por “história da dissociação” (Kolarevic, 2003: 57), distingue dois momentos basilares no exercício da arquitetura:

o *Desenho* - associado a tarefas de representação com vista à conceção, desenvolvimento, análise e comunicação de uma solução;

a *Construção* - envolvendo tarefas de materialização com o intuito de alcançar a manifestação física do objeto projetado.

Mitchell William sobre a abordagem do arquiteto à dualidade desenho/construção, refere que este tende a representar o que pode e sabe construir (2001: 354) e aqui podemos mesmo ir mais longe pois o que enfatiza a dependência entre a forma e os processos de produção, também põe em evidência que qualquer evolução na “*condição de produção*” (e na condição tecnológica da produção) se apresenta consequentemente como uma oportunidade para a expansão das possibilidades formais da arquitetura e, logo, para que o arquiteto possa e saiba (mais) construir (mais).

8.10 Conceito de forma-Síntese ou tecno-estrutural

O conceito enunciado pela tese, traduz uma síntese entre a forma estrutural informada pela geometria do espaço e pelo funcionamento estrutural, com a forma construtiva que caracteriza o processo de materialização da forma estrutural, permitindo que a forma se manifeste fisicamente, cumprindo assim o designo último da arquitetura.

Este conceito nada tendo de novo, no sentido da sua utilização empírica, não nos parece estar corretamente contextualizado e conceptualizado, a nível da Teoria e prática da Arquitetura.

⁴⁵ Assunto desenvolvido no Capítulo 6

Com efeito, ele é intrínseco aos processos ancestrais que tinham que gerir os recursos técnicos e materiais, e.g. o dos arquitetos sassánidas⁴⁶, cuja técnica, oriunda da Pérsia, através da disseminação do islamismo chegou ao sul de Portugal⁴⁷.

Na origem desta técnica estão os recursos parcos disponíveis e, assim, com base em blocos de terra, único material disponível com abundância, foi apurada uma geometria, cuja forma permite que se crie vão, sem que se produzam trações. A geometria apurada tem como base uma superfície parabólica, que não recorre a andaimes ou cimbramento para ser construída, sendo fruto de um aparelho disposto só à compressão, assente com argamassa, a qual confere tolerância construtiva ao sistema.

A racionalidade e eficiência do processo fez com que a técnica fosse adotada na Catalunha, numa altura em que a madeira disponível foi utilizada na construção naval.

8.11 Fase E

8.11.1 Montagem/Construção

A montagem é o culminar do o fluxo de trabalho desenhado, sendo o reflexo desse ciclo. Este momento no qual o projeto é implementado esta altamente condicionada por todas as opções tomadas ao longo da fase de conceção. Deste modo a sua eficiência decorre de uma visão transversal da prática da arquitetura, que decorre de uma metodologia e de um processo mental capaz de abarcar todas as dimensões contidas no ato de projeto.

A construção é um momento decisivo para a Arquitetura, marca um momento de passagem e constrói-se como a manifestação material do projeto. O seu resultado é

⁴⁶ Ponce, Alfonso Ramírez (2002) *Arquitextos*, Vitruvius
<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/03.028/750/pt>

⁴⁷ José Sánchez Leal - Bóvedas extremeñas y alentejanas de rosca y sin cimbra *Actas del Tercer Congreso Nacional de História de la Construcción*, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, 200

definidor e decisivo para a a percepção e caracterização do artefacto arquitetónico, marcando o modo como a obra é entendida e valorizada.

No presente caso a materialização foi objeto de especial atenção tendo sido concebido um sistema construtivo *Brick-warp* que visa otimizar o processo de construção, tornando-o mais rápido e sem requerer mão-de-obra especializada o que diminui os custos de produção das superfícies curvas.

8.12 Sistema construtivo *Brick-Warp*

O paradigma operativo desenhado apresenta um carácter geral, contudo na fase final como modo de demonstração da visão holística do processo, personaliza a abordagem, expressando o desígnio do ciclo operacional do sistema construtivo proposto.

Os processos de fabricação digital e os sistemas construtivos, apresentam algumas dificuldades em responder com eficiência à construção de superfícies curvas.

Com o intuito de otimizar o ciclo de construção destas superfícies, desenhou-se um ciclo de trabalho que integra, o processo de produção em série e os processos de fabricação digital subtrativos. A sua conjugação permite-nos vantagens a nível do custo e do tempo de execução. Os módulos cerâmicos standardizados obtidos através de um sistema de produção em série, são posteriormente personalizados com recurso às ferramentas de fabricação subtrativa, configurando a peça final.

A configuração das peças resulta do conhecimento do funcionamento estrutural da superfície e este determina o fluxo da força, essencial para o desenho das peças. Estas devem posicionar-se de modo perpendicular à força para que não se gerem deslizamentos.

O desenho da estereotomia dos módulos cerâmicos inicia-se com o processo de *tessellation*, este resulta da divisão da superfície em linhas contínuas perpendiculares à força gerada pela forma. A segmentação da forma é feita em função da dimensão maior das peças cerâmicas, assim definindo os diversos níveis de construção, cuja configuração se assemelha a curvas de nível, que funcionam à compressão.

De seguida dividem-se os troços de superfície horizontalmente pela menor medida da peça cerâmica e o mapeamento da superfície feito nestes termos, assegura a estabilidade durante a montagem e um funcionamento estrutural da superfície no qual as peças não estão sujeitas a deslize.

O processo de *tessellation* é a padronização da superfície em função dos módulos utilizados na construção e o padrão é orientado de acordo com o funcionamento estrutural da forma, seguindo o fluxo da força.

A estereotomia das peças decorre da conjugação do processo de *tessellation*, com a inclinação da superfície.

As faces exteriores da estereotomia – intradorso e extradorso - correspondem quase sempre ao tamanho da peça original, excepto nas situações em que é necessário efetuar ajustes nas peças, para que estas correspondam à superfície desenhada.

As faces interiores, i.e., faces de contacto entre peças, resultam da inclinação da superfície, sendo a peça personalizada através de CNC, para se ajustar à superfície.

Uma vez apurada a estereotomia inicia-se o processo de fabricação sendo este suportado por um modelo 3D da superfície que apresenta a configuração de cada uma das peças.

8.13 O Direito e a Legislação, na perspetiva e na atividade do Arquitecto

8.13.1 Elencagem e considerações sobre alguns dos elementos estruturantes na relação entre Direito e Arquitectura:

A Arquitectura é uma disciplina do conhecimento humano transversal a diferentes áreas da Sociedade. Ao mesmo tempo, vários dos seus objetos de estudo resultam da reflexão interdisciplinar com outras áreas do Conhecimento, como a História, a Antropologia, a Religião, a Matemática ou, especificamente, a Geometria.

Neste contexto, justificar-se-á, pois, uma incursão que procure alguma abrangência com outras áreas que possam assumir importância axial para a Arquitectura. Ora, ao longo

da presente tese pode constar-se já terem sido abordados, incidentalmente, aspetos relevantes no âmbito da Filosofia, Religião, História Matemática ou Geometria.

Muito pouco, porém, foi dito da intersecção entre a Arquitetura e o Direito. E esta Ciência revela-se essencial, já que muitas vezes informa, pré-informa ou impõe i.e., *pode* portanto *condicionar*, a intervenção do Arquiteto (e também do Promotor ou do Construtor) quer ao nível do programa, quer da ideação conceptual, quer ainda da construção do artefacto arquitetónico.

Face ao exposto, neste subcapítulo, procurar-se-á no âmbito de uma súpula antecipava, enunciar as linhas de força estruturantes, na ligação entre o Direito e a Arquitetura, sobretudo no que a esta última e ao Arquiteto possam interessar.

Assim, deverão considerar-se as seguintes linhas de força nessa relação, as quais se entende deverem ser ponderadas pelo Arquiteto, dentro e fora do âmbito da Arquitetura:

- a) Como primeira linha de força, ter-se-á que o Arquiteto deve pautar a sua atuação por um conjunto de normas que definem a sua conduta profissional, e.g.;

1-, Normas que podem ser heterogéneas e que resultam do ordenamento jurídico aplicável a qualquer cidadão, aplicabilidade essa que pode resultar da sua interação, quer com outros cidadãos (e poderemos ter aqui como exemplo o Direito das Obrigações) quer diretamente com o Estado (e.g., o Direito Fiscal ou o direito de recorrer a tribunais);

2- Normas resultantes do regime de auto-regulação da profissão, na medida em que o Estado entendeu “devolver” esse poder à Ordem dos Arquitetos, poderes que em última análise lhe cabiam enquanto Comunidade política organizada, Soberana, de Direito, e Democrática.

É, por exemplo, aquela “devolução” que permite à Ordem controlar o acesso à profissão ou exercer poderes disciplinares sobre os seus membros, no estrito âmbito das suas competências.

Este último poder, como não podia deixar, deve considerar-se como configurando um grau mais *incompleto* de “devolução”. Com efeito, nestes casos a “decisão corporativa” não poderá por norma considerar-se definitiva, pois bem se compreende, que a cada Arquiteto, precisamente porque cidadão, por norma deva ser permitido o acesso

aos tribunais em caso de discordância com qualquer decisão corporativa (sup a.1).

- b) Uma segunda linha de força poderá ser definida como aquela que determina que o Arquiteto deve pautar a sua atuação profissional em contexto concreto e específico, em conformidade com aquele conjunto de normas que define o enquadramento legal, que muitas vezes, pré-define ou conforma aspetos significativos de todo o percurso conducente à produção do artefacto arquitetónico.
- c) Por esse motivo devem já estar vertidos inicialmente no programa, dado o seu carácter estruturante, as mais diversas normas a que o Arquiteto deva obediência e cumprimento, no âmbito do seu mister, como:

1-Regimes específicos, em função da matéria, como o RGEU ou o RJUE;

2-Regulamentação de incidência territorialmente circunscrita, municipal ou regional - casos dos Açores e Madeira - e.g., PDM, PPormenor, PSalvaguarda;

3-Regimes especiais, em termos de: normas construtivas, patentes, certificações, etc.;

- c) Uma terceira linha de força, por muitos considerada prosaica, mas incontornável e decisiva, é que, qualquer outro enquadramento legal deverá ainda ser considerado decisivo, enquanto condição *a posteriori*, para a implementação legalmente validante, ou melhor, validável (da execução) do projeto.

Pense-se aqui nas mais variadas licenças, como as de utilização ou habitação que mais não são do que atos administrativos, legalmente fundados em diplomas e matérias da mais variada índole;

- d) Ainda, é preciso considerar que, determinadas opções jurídicas anteriores, pré-condicionam as possibilidades de ideação do arquiteto e, em reciprocidade, determinadas opções projetistas, podem impor regimes ou consequências jurídicas específicas, quer ao projeto e ao projetista, quer ao comissionista do projeto (e que o pretenderá implementar e rentabilizar, comercializando-o) quer ao construtor;

e) Finalmente, especificamente no que concerne ao arquiteto, uma área que pela complexificação da vida moderna, só poderá adquirir cada vez maior relevância (e só por isso, é aqui autonomizada) é a da responsabilidade civil, em qualquer das suas vertentes, quer contratual, quer extra contratual, quer ainda por por simples risco. Já aqui, não se considera de abordar, por manifestamente extrusivo, os problemas jurídicos colocados à Arquitetura, no âmbito penal, designadamente da corrupção.

8.13.2 Algumas implicações práticas que resultam da conjugação e interação das linhas de força referidas supra:

Neste subcapítulo pretenderá assegurar-se a realização de um pequeno varrimento sobre as matérias, abordadas supra, apenas perfunctoriamente, por necessidade de condensação da exposição.

O objetivo do mesmo é o de procurar evidenciar, concretizando, consequências, aspetos ou áreas no domínio da Arquitetura, que hoje estão fortemente caucionados pelo Direito e que deverão, por isso, ser necessariamente tidos em conta pelo Arquiteto, em diversos momentos do projeto.

Estas áreas abrangem desde o programa, à ideação, até à construção, sendo que algumas já o são ponderadas, ou empiricamente, ou sem propriamente sequer os seus intérpretes (de ambos os lados) se darem bem conta disso. Eis a ilustração do que se disse com alguns exemplos.

É assim que na atividade projetista do Arquiteto poderá ser necessário compaginar a densidade de fogos ou de moradores, quer em área, quer em altura e estabelecer uma correlação com a dimensão de áreas verdes, por exemplo.

Tratar-se-á aqui de aspetos que *conformam* o conjunto, melhor dizendo, informam-no previamente (e é por isso que terão de já estar incluídos no programa) e que consequentemente importarão *consequências* na ideação do Arquiteto.

Por outro lado, diversas obrigações jurídicas *informam previamente* diversos tipos de projetos de construção, determinando quer (composições de) materiais, quer opções e

processos construtivos ou simplesmente estruturais, atente-se aqui, entre outros, para aspetos como a sismicidade, o risco de inundação ou a eventualidade de ventos fortes.

Mas, inclusivamente, aspetos tão elementares como as opções tipológicas com que o programa arquitetónico é ou não preenchido podem ter relevância na fiscalidade, pré ou pós comercialização, a nível de IMT ou IMI, por exemplo. Pense-se na proporção, na totalidade da área edificada, entre áreas de apoio e áreas ditas de habitação ou a diferenciação e valores de licenças para ambas as áreas ou respetivos valores de IMI. Estes aspetos podem fazer alguma diferença ao nível da venda do imóvel, afetando a rentabilidade do todo projetado (e, logo, da avaliação da escolha do projeto - e do Projetista...) já que num ou noutro momento, pré ou pós-venda, serão tributados diferentemente.

Mesmo aspetos como a facilidade e/ou custo de manutenção do edificado podem fazer a diferença ao nível da definição do valor do condomínio, podendo ser este aspeto igualmente detrator do ponto de vista comercial e, portanto, de um dos aspetos em que o sucesso do projetista pode ser medido pelo mercado.

Mas, mesmo sem referir eventuais moradores, a conceção otimizada, ou não, dos aspetos de manutenção do edificado pode interferir por exemplo com valores de seguradoras ou com os interesses da entidade exploradora do edifício, e é preciso não esquecer que tudo tem um custo e que, parte significativa da Arquitetura existe e é destinada para ter valor comercial.

Igualmente, opções políticas (vertidas em diploma legal, necessariamente) de fixação de populações ou indivíduos em determinadas áreas (como o interior) terão obrigatoriamente influência na própria conceção de programas, pois poderá para o efeito ser necessário prever escolas, ou centros de saúde ou comerciais ou mesmo áreas industriais. Ora, cada uma destas utilizações requer determinadas exigências jurídico-legais que, mais do que sobrepor-se, informam previamente a própria ideação (individualmente ou de conjunto) pelo arquiteto.

Também, opções estratégicas, leia-se, políticas que, necessariamente, terão de ser conformadas juridicamente, até do ponto de vista da alocação e candidatura a fundos. Com efeito, bem se compreende que as mesmas obrigam a uma cuidadosa avaliação estratégica, previamente à própria conceção do programa; ou, se se quiser ser mais

verdadeiro, ele já virá em parte pré sugerido pelo legislador...É o caso das novíssimas propostas de renovação de parques habitacionais ou escolares, por exemplo.

Finalmente, haverá a ter em conta o “sal e pimenta” ou melhor dizendo “the daily bread and butter” do trabalho do Arquiteto, que continua a ser o RGEU e o RJUE ou os PDM e os PPormenor.

Por esta breve resenha, que mais do que informativa, descritiva ou englobante, pretendeu ser apenas um pequeno, e intencionalmente incompleto, “croquis” se pode aquilatar do nível, importância e grau de penetração, do Direito na Arquitetura (e, inversamente, da Arquitetura no Direito) em praticamente todos os seus interstícios.

8.14 Contextualização teórica ideológica – *Design morfogenético*

O paradigma operativo e o sistema construtivo desenvolvido, pelos meios, princípios, estruturação e flexibilidade, permitem colhem o conceito enunciado por Hensel e Menges, através do qual estes autores propõem uma mudança no exercício de projeto, suportado nas ferramentas digitais e nos processos generativos, como modo de integrar o lugar e a tectónica da peça de arquitetura.

A “*morfo-ecologia*” enuncia e propõe uma abordagem alternativa à conceção feita com princípios sustentáveis. Preconiza um novo modo de pensar a conceção arquitetónica, configurando-se como uma metodologia radicalmente nova, afastando-se do conceito vulgarizado de “ecologia”, e dos chavões “verde” e “sustentável”.

O desafio colocado passa por repensar a “ecologia” como uma relação entre o organismo e o seu ambiente; esta perspetiva realça a importância da relação que se estabelece entre as pessoas, o ambiente construído e o ambiente natural.

Os processos de abordagem ao lugar e o desenvolvimento do construído são suportados pelas novas tecnologias, estas permitem o desenvolvimento de um processo generativo, também ele, facilmente comparado como os processos dinâmicos do mundo

natural⁴⁸. A arquitetura tem deste modo tanto a ver com o Habitat humano, como com as tecnologias digitais que permitem um modelo generativo de conceção.

Hensel e Menges tinham desenvolvido o conceito de “*Morphogenetic Design Strategies*”, esta abordagem tem como substrato conceptual as ciências, a teoria dos sistemas, a filosofia e o modo como os sistemas e os padrões complexos surgem de uma multiplicidade de interações relativamente simples – *Techniques and technologies in Morphogenetic Design*.

Michael Hensel e Achim Menges, não abordam a forma como a consequência de uma função, ou como materialização em si mesmo de um qualquer objeto, mas como consequência de uma interação entre a peça arquitetónica e o seu meio ambiente específico. O pensamento desenvolvido enfatiza o desempenho da arquitetura no contexto específico, em que o objeto arquitetónico se insere. Ao encarar a Arquitetura como parte integrante de um conceito alargado de ecologia, esta abordagem oferece ao utilizador uma experiência espacial intensificada pelas condições climáticas oferecidas pelo objeto arquitetónico.

A forma é deste modo resultado de um processo de síntese, que decorre de uma adaptação primária⁴⁹ no qual participam um conjunto de aspetos ambientais e microclimáticos, sendo a peça arquitetónica uma reação ao seu contexto ambiental específico.

O design “*morfo-ecológico*” decorre de abordagem instrumental, em que o dualismo forma e função é preterido, por uma sinergia que aspira à obtenção de soluções integrais e a um modelo alternativo de sustentabilidade. Esta visão permite entender a peça arquitetónica como parte de um meio com o qual se relaciona, sendo ela o elemento material-pivot desse processo iterativo.

⁴⁸ AD 192 -Architectural design march/april 2008 Versatility and Vicissitude Performance in Morpho-Ecological Design ISBN -978 0470516874 profile nº 192 vol 78 nº2 , England, Wiley - Academy, Pag 5.

⁴⁹ Ludwig von Bertalanffy na teoria geral dos sistemas refere-se à adaptação dos seres vivos a que chama regulação dividindo-a em primária e secundária, sendo que o mecanismo de adaptação primária está relacionada com adaptação da forma ao meio.

Na criação desta abordagem confluem os conceitos de “versatilidade” e “vicissitude”. A “versatilidade” implica a noção do comportamento e do desempenho de um organismo ou artefacto dentro de um contexto específico, abordando tanto o objeto como o sujeito. A “vicissitude” implica a diferenciação do objeto e da dinâmica estabelecida com o ambiente.

Segundo Menges e Hensel a “ecologia” é como não podia deixar de ser, um conceito central para o design *morfo-ecológico*. Esta abordagem preconiza um alto grau de articulação do ambiente com o construído. A mutabilidade e o feedback baseiam a relação entre um determinado habitat e os habitantes que produzem diversas e intensas interações sociais e ecológicas.

Esta abordagem marca uma mudança significativa nos princípios conceptuais da arquitetura, interligando a conceção e a produção para níveis de eficiência até agora não considerados. A articulação destes princípios apresenta um enorme potencial conceptual podendo gerar profundos impactos no futuro do ambiente humano. O desempenho que resulta da organização espacial, da construção e desempenho do material torna-se assim um motor da *morfo-ecologia*.

A adaptabilidade é um conceito oriundo da biologia e resulta da adaptação dos organismos vivos ao meio. Bertalanffy refere-se a este processo por “*regulação, sendo que*”, a contextualização deste princípio no domínio da Arquitetura traduz-se num aumento da adaptabilidade do edifício ao contexto geográfico, tornando o objeto arquitetónico mais adaptado ao seu meio, o que configura vantagens na utilização do espaço gerado.

Este conceito apresenta dois níveis de interação com o lugar, por um lado, a adaptação ao meio, que se traduz numa adequação da forma ao lugar e que o autor chama de regulação estática e, por outro, a resposta ativa do edifício ao lugar, traduzido por sistemas moveis de sombreamento e ventilação e, aqui, teremos a regulação dinâmica.

A relação com o *lugar* expressa pela morfo-ecologia, introduz novos pressupostos na relação com o *lugar*, esta não rejeita ou põe em causa o conceito de *Genius Loci* ⁵⁰, enunciado por Norberg-Schulz, ou o carácter identitário do edificado, antes pode conferir

⁵⁰ *Genius Loci*, o arquiteto Norberg-Schulz busca na filosofia grega uma reflexão sobre o conceito de lugar. Para os gregos cada lugar era regido por um deus, *genius loci* (25), ou o espírito do lugar. Towards a Phenomenology of Architecture Paperback – June 15, 1991

novas abordagens e aprofundar a interação do artefacto arquitetónico com o lugar/meio, cruzando o espírito do lugar com a orografia, a insolação, a vegetação, o regime hídrico, entre outros.

Os novos critérios de conceção colocam desafios metodológicos e construtivos, exigindo sistemas construtivos adaptáveis e flexíveis, formalmente, acarretando também uma metodologia de suporte capaz de responder a estes desígnios.

O sistema construtivo e a metodologia desenvolvida, pela suas características e flexibilidade permitem abarcar os pressupostos e exigências deste conceito, permitindo assim inserir-se ideologicamente neste conceito, do design morfo ecológico.

Capítulo 9 – Sistema construtivo Brick-Warp

9.1 Preâmbulo

A investigação produzida por esta tese desenvolveu-se em dois planos: Por um lado, um plano teórico que se consubstanciou no desenho de um paradigma operativo para as superfícies curvas e de dupla curvatura e, por outro, um plano operacional que se traduziu na criação de um sistema construtivo, capaz de formalizar superfícies curvas de um modo mais económico e eficaz.

O desenvolvimento do sistema construtivo foi também uma oportunidade para testar e o modelo metodológico proposto e, deste modo, perceber que partido tirar da produção dos protótipos e das sucessivas etapas que a sua construção acarretou.

O quadro operativo concebido encontrou uma expressão operacional no sistema construtivo e este pretende constituir-se como uma resposta tectónica às superfícies curvas, resultantes dos processos formativos e generativos das ferramentas digitais (vide Cap. V).

O sistema tectónico proposto, por sua vez, não se remete exclusivamente a uma relação mecânica entre peças que criam um artefacto arquitetónico, antes, tem um substrato teórico suportado por uma metodologia que aborda os processos conceptuais baseados no novo paradigma autográfico gerado pelo “*continuo digital*”.

Para o efeito, procura consubstanciar um conjunto de axiomas operativos que confirmam solidez à utilização destas ferramentas e, em simultâneo, encontrar um fluxo de trabalho capaz de otimizar a utilização de superfícies curvas.

Como já foi abordado, as ferramentas digitais, cada vez mais presentes no ciclo conceptual, permitem manipular as geometrias complexas com grande eficácia. Já os processos de produção e construção decorrentes revelam uma marcada falta de adaptação às superfícies curvas. Assim, é neste contexto que emerge a necessidade de novos sistemas (construtivos) capazes de dar resposta às necessidades construtivas das superfícies curvas e dos processos digitais de conceção.

O caso prático, em análise, consiste num sistema modelar personalizável ou, para usar um termo mais comum no mundo técnico, customizável, o qual articula peças cerâmicas que são fixas por cabos que geram pré-esforço.

Para facilitação de *referência*, denominámos o sistema por “*Brick-Warp*”. O nome decorre do facto de a construção ser feita com *tijolos (bricks)* estabilizados por uma *teia* (e, em certos enquadramentos, igualmente por uma *trama*) que, literalmente, os *urde* (e é, aliás, esta a tradução clássica de “*warp*”, em *português*). E este vocábulo pode ainda ser associado ao conceito de “*warp drive*”⁵¹ que expressa uma geometria que não permite um percurso linear entre dois pontos, mas antes, uma passagem feita através de uma flexão do espaço, o que permite encurtar o tempo e a distância percorrida.

Com efeito, quer no conceito de “*brick-warp*”, quer no de “*warp drive*” estão presentes, tanto a noção de encurtamento linear, de uma superfície (porque em) curva, como do encurtamento do tempo de realização de uma atividade, como, também, no caso *sub specie*, da diminuição de complexidade na realização da mesma e, daí, a opção da designação de execução em “*Brick-Warp*”.

O recurso à construção de protótipos à escala permitiu, por um lado, compreender o desempenho do sistema proposto, e por outro, integrá-lo na conceção do processo de montagem e construção das superfícies curvas.

O ciclo de evolução do sistema iniciou-se com a construção de um primeiro caso de estudo, no qual se formalizou um arco com 1.20 m de vão, tendo sido sucedido pela realização de um segundo caso de estudo, no qual se formalizou a execução de uma abóbada de berço com 3m de vão. A evolução tipológica referida, expressa também a evolução, quer da complexidade tectónica, quer do funcionamento estrutural do método proposto.

As superfícies com uma só curvatura respondem não só de modo mais favorável a uma possível implementação industrial do referido sistema face a outros atualmente existentes, no seu presente estágio de desenvolvimento, como, também, se adequam

⁵¹ O conceito geral de “*warp drive*” foi introduzido por John W. Campbell em seu romance de 1931 *Islands of Space*, baseando-se na doutrina da relatividade, então recente, de Albert Einstein.

aos atuais recursos tecnológicos e logísticos, disponíveis para a realização desta pesquisa.

Esta abordagem faseada permitiu apurar, gradativamente, o sistema de construção para superfícies curvas. Já a evolução de escalas permitiu compreender e resolver os problemas de construção e antecipar os desafios da escala seguinte.

Deste modo, o quadro operativo e o fluxo de trabalho que envolveram as fases de conceção, fabricação e construção, permitiram não só a sua aplicação na produção do protótipo, como também ficou mostrado que os ensinamentos colhidos podem claramente ser utilizados na abordagem de fabricação de artefactos arquitetónicos à escala real.

Com efeito, o vão que foi construído, pela sua dimensão e grau de proximidade com a escala que se pretende alcançar, permite inferir da segurança e fiabilidade da metodologia e do sistema construtivo, pelo que, em função da experiência acumulada, registada, pode afirmar-se que o planeamento e a construção de uma forma à escala real far-se-ia com total segurança e sem sobressaltos.

O trabalho teve como meta a criação de um vão que correspondesse às necessidades da construção de tipologias habitacionais, por serem estas as mais comuns e as mais produzidas, logo aquelas em que um sistema de maior eficiência estrutural produziria mais impacto.

O vão atingido pelo protótipo permitiu ainda testar o seu funcionamento estrutural, uma vez que o facto de serem formas geradas para produzir compressão, torna possível extrapolar o seu comportamento estrutural a outras escalas. Ou, como bem ensina Bennett:

“as abóbadas estão simplesmente num equilíbrio que resulta da compressão, este princípio aplica-se a qualquer escala, sendo por isso possível testar pequenos modelos e antecipar o que acontece na escala de um grande edifício.” (Bennett, 2012)

Ainda, segundo Philippe Block, quando as formas funcionam à compressão as tensões desenvolvidas são mínimas, pelo que é possível escalar a forma e, deste modo se o protótipo ou modelo funciona, o objeto real também irá funcionar.⁵²

O equilíbrio básico de forças é assim o princípio conceptual mais importante para a conceção estrutural. Este conceito que foi o elemento operativo para a criação das mais diversas estruturas históricas e vernaculares, como o de Antóni Gaudí e a Sagrada Família, é contudo, na conceção moderna, muitas vezes ignorado ou negligenciado, sendo que a análise da linha de impulso, leia-se, o já referido *conceito do caminhar da força*, deveria informar a conceção das formas, assegurando o seu desempenho e ajudando a tomar melhores decisões estruturais ao projetar arquitetura.

9.2 Opção tecnológica

A escolha da cerâmica como material para formalizar a superfície surge de um modo natural, pois a pasta cerâmica revela-se especialmente plástica e, como tal, adequada aos requisitos geométricos das formas estruturais curvas. O material apresenta uma grande capacidade de adaptação formal, sendo a sua manipulação e modelação fácil, existindo ainda para assistência à execução de toda a metodologia, um vasto conjunto de técnicas e know-how, extremamente adequados à produção de moldes para este material.

A construção de superfícies curvas com ladrilhos cerâmicos remonta aos romanos e aos árabes, tendo estes povos deixado um enorme legado tectónico nos territórios que ocuparam.

Estas técnicas foram ao longo dos tempos sendo adaptadas e adquirindo designações locais, do qual são exemplo as Abóbadas Mexicanas, Núbias, Catalãs ou Abóbadas Gustavianas designação adotada nos Estados Unidos, onde foram patenteadas pelo mestre de obras Rafael Gustavino Moreno, que para lá emigrou, vindo de Espanha. Pode ainda encontrar-se esta técnica no sul de França e Itália, tendo por exemplo em

⁵² (Autumm Lecture Series Philippe Block ETH Zurich, 29 th November 2016
<https://www.youtube.com/watch?v=MTjsLufOKTE>

Portugal esta técnica uma expressão regional, que resulta da ocupação árabe no sul de no nosso país.⁵³

A tradição de séculos criou o know-how que consolida um dos significativos *clusters* da indústria portuguesa. Este sector, como bem refere Leal, alia à grande qualidade de produção e competitividade, uma permanente necessidade de inovação (Leal, 2000:1)

A possibilidade de disseminação da técnica foi igualmente ponderada, na escolha do material, pois o barro é um material disponível e abundante, de custo acessível, sendo possível efetuar localmente a sua recolha, fabricação e utilização. O sistema parece assim ter várias das condições necessárias para assumir um carácter quase universal, evitando os custos elevados e os (respetivos sobre) impactos decorrentes do transporte.

Parece, pois, poder concluir-se, de todo o acervo referido, que as peças cerâmicas reúnem deste modo um conjunto de características que as torna únicas, e economicamente adequadas para a fabricação de geometrias complexas, designadamente em curva ou curva e contra curva, bem como superfícies, dessa natureza ou não, mas individualizadas, personalizadas e, logo, customizadas (aqui no sentido de produzidas em série, com individualização).

9.3 Computação e o Vernacular

O sistema proposto busca os seus princípios operativos numa tradição vernacular, que nos chega dos processos árabes de construção, procurando especificamente descrevê-los, trazê-los, enquadrá-los e fundi-los, no âmago do enorme potencial das ferramentas digitais.

O manancial da arquitetura vernacular é enorme e não deve ser desprezado, pois a validade dos seus princípios é inquestionável, uma vez que resulta de um longo processo de adaptação e resposta efetiva ao meio ambiente e ao seu contexto tectónico, além de ter sido sancionada pelos maiores dos juízes, concretamente, o tempo e a

⁵³ Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, 2000. Bóvedas extremeñas y alentejanas de rosca y sin cimbra José Sánchez Leal

eficácia; neste sentido é possível classifica-la como um processo de adaptação estática⁵⁴.

A arquitetura vernacular oferece um conjunto de conhecimentos que decorre de um saber feito da experiência, como diriam Camões e Duarte Pacheco Pereira, em que as soluções formais e espaciais decorrem de um aperfeiçoamento milenar, no qual os materiais locais foram trabalhados de modo a obter as formas com um carácter estrutural, cuja resposta arquitetónica respetiva é a mais eficiente e mais adaptadas ao contexto, material, económico, social e cultural em que se inserem.

A computação permite exponenciar estes princípios, dado que coloca ao dispor dos projetistas um conjunto de ferramentas poderosas, que permitem a manipulação e simulação dos vários parâmetros que informam a (a opção da) forma arquitetónica.

Deste modo é possível projetar peças arquitetónicas mais adaptadas ao seu meio, em que os espaços que as constituem se revelam mais confortáveis eficientes e mesmo estimulantes para os seus utilizadores. Este modo de articulação pode considerar-se como constituindo uma abordagem genérica, mas sendo, ao mesmo tempo seminal para alguns dos princípios caracterizadores, da morfo-ecologia definida por Hensel e Menge, concretamente, a adaptação da forma ao meio ou a economia de recursos, entre outros.

Estas ferramentas permitem ainda uma maior rapidez na conceção, na simulação e avaliação da forma ao meio, que de outro modo levariam anos e se tornariam impraticáveis quer pelo tempo de cálculo, quer pelos custos.

9.4 Constituição do sistema construtivo

O sistema é formado por três elementos base, concretamente (1) os cabos que funcionam em articulação com (2) as peças de clipagem e (3) os módulos cerâmicos.

Os cabos têm a função de estabilizar o processo de construção da superfície, evitando a necessidade de cimbres, cavaletes ou cofragens. A utilização dos cabos decorre da

⁵⁴ Momenclatura criada por Berrtalanffy para classificar os processos evolutivos na natureza

sua capacidade de adaptação formal. As trações que produz permitem a estabilização das peças cerâmicas durante o processo de montagem da superfície.

As técnicas tradicionais como as abóbadas Catalãs, Núbias ou Mexicanas, é certo que também dispensam qualquer infraestrutura de suporte durante a construção, mas o seu processo construtivo é limitado, só admitindo a colocação de peças à compressão. Esta caracterização condiciona por isso a geração da forma, implicando que esta apenas gere compressões ao longo de toda a superfície.

A introdução de cabos no sistema construtivo, em contrapartida, permite alargar o espectro das formas construídas, sendo possível construir partes da superfície que não estejam só à compressão, durante a sua construção, sem que estes troços da superfície gerem o desequilíbrio imediato na forma.

O cabo permite gerir conflitos de direções entre o peso próprio dos materiais e o vão a produzir, sendo que por isso a sua aplicação dispensa a utilização de cimbres ou cofragem.

Com efeito, a estabilização da forma através de suportes (cimbres) durante a construção do vão ou através da produção de uma cofragem curva assume um grau de dificuldade acrescido, a que se acrescem efeitos próprios da gravidade durante a betonagem das superfícies curvas, aspetos esses que tornam particularmente dispendiosa e difícil a produção das formas curvas.

Os módulos cerâmicos formalizam a superfície concebida mediante uma personalização prévia, resultando o seu funcionamento da produção de compressões geradas pelo peso próprio da forma e das solicitações a que é submetida.

A escolha do material para os módulos teve presente as variações formais decorrentes da necessidade de personalização dos módulos standardizados, sendo necessário um material capaz de se moldar de um modo versátil e com baixos custos.

As peças cerâmicas standardizadas são produzidas por um processo de moldes de prensagem. Num segundo momento estas peças são personalizadas recorrendo a ferramentas CNC, pelo que deste modo é possível reduzir os custos e o tempo da respetiva maquinagem.

A compressão gerada nos módulos pelos cabos permite abdicar do cimbramento que este universo formal e construtivo normalmente requereria no respetivo processo de

produção. Este aspeto revela-se de grande importância e torna o sistema proposto particularmente simplificador e competitivo, diminuindo em muito o tempo de construção e os custos inerentes à infraestrutura necessária para a produção de superfícies curvas e de dupla curvatura.

O método, comparativamente com outros sistemas, é menos exigente em termos dos requisitos necessários para a produção destas geometrias, distinguindo-se ainda pela eficiência, facilidade de construção, baixos custos, flexibilidade e capacidade de adaptação à fabricação da dupla curvatura.

Deste modo é possível fazer face às implicações construtivas e financeiras que a produção desta tipologia acarreta, viabilizando a sua construção, capacitando-a assim para a tornar mais presente na arquitetura contemporânea.

9.5 Caso prático I

Para primeiro protótipo foi escolhido um arco, que é a forma estrutural mais simples, do universo das superfícies curvas, o que permitiu iniciar da forma gradativamente menos complexa, a abordagem às exigências operativas destas formas.

Este primeiro protótipo visava antecipar os problemas decorrentes da construção e, assim, fazer prosseguir o módulo de trabalho, de uma maneira intelectual e fisicamente sólidas, para uma escala maior.

O primeiro passo do processo foi o desenho de um módulo capaz de dar resposta funcional à passagem de um cabo no seu interior. Este requisito básico do sistema construtivo tinha por função bloquear o momento externo aplicado durante o período de construção.

Por este motivo, foi trabalhado um módulo constituído por duas camadas separadas entre si. Esta descontinuidade não só permite a passagem do cabo de estabilização, como possibilita realizar o corte térmico e dificulta ainda a passagem de ondas sonoras, através do efeito massa, mola, massa. Aspeto não despreciando, o sistema acaba assim por dar resposta a diversas exigências da construção contemporânea, ao resolver a questão da passagem do cabo.

No desenho do módulo teve-se igualmente presente as facilidades de personalização, sendo trabalhada a sua configuração, de modo que esta seja facilmente ajustável e, assim, capaz de responder a diferentes configurações das superfícies curvas.



Figura 9.1 – Módulo cerâmico, protótipo I
(do autor)

A produção das peças para este primeiro protótipo foi feita de modo rudimentar, tendo sido utilizadas um conjunto de técnicas básicas para a sua manufatura.

A modelação foi feita em duas fases, já que num primeiro momento foram modeladas placas de barro que constituem as folhas que compõem o módulo. Após algum tempo de secagem, procedeu-se a uma colagem em duas fases, sendo que na primeira se colava a folha interior – (intradorso) aos elementos laterais e, posteriormente, era colada a folha exterior – (extradorso), desfasada da folha interior, assim acolhendo o encaixe da peça. A união destes elementos é feita através de colagem com lambugem⁵⁵.

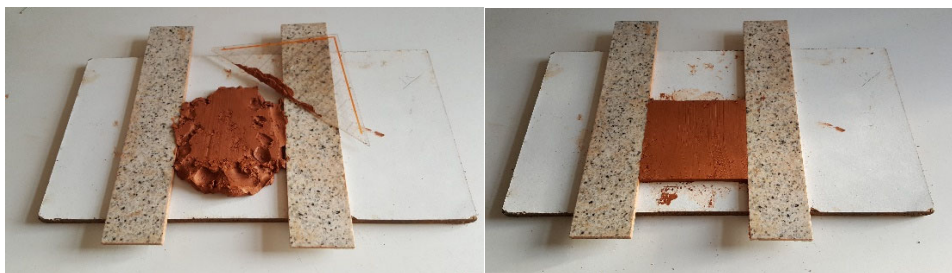


Figura 9.2 – Construção do módulo
(do autor)

⁵⁵ Pasta cerâmica liquidificada que permite a colagem de peças.

Uma vez cumprido o período de secagem, as peças passaram por um ajuste das suas faces de encaixe, para que estas adquirissem o ângulo correto e assim pudessem gerar ou, melhor, gerar, a superfície pretendida.

Foi escolhido um arco de volta perfeita para esta primeira experiência, por este apresentar um raio constante e deste modo ser possível, com uma só peça construir toda a tipologia estrutural, i.e., o arco de volta perfeita, evitando nesta fase de evolução do sistema, a necessidade de personalização das peças.

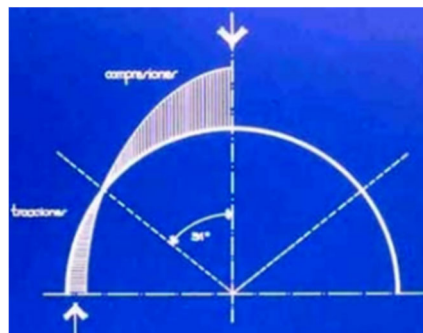


Figura 9.3 – Gráfico de tração, compressão
(Arquitextos, 2002)

Esta opção coloca, contudo, algumas questões no capítulo do funcionamento estrutural, pois os arcos de volta perfeita ou as superfícies esféricas geram o aparecimento de tensões de tração, por volta dos 52°, o que conseqüentemente coloca problemas estruturais. Ora, é precisamente a colocação de cabos que permite, através do pré-esforço, eliminar este fenómeno, e estabilizar a forma durante a construção.



Figura 9.4 – Molde de cartão para ajuste das peças
(do autor)

As peças foram retificadas uma a uma, de modo manual, recorrendo a ferramentas abrasivas, por forma a gerar o encaixe perfeito. Esta tarefa foi realizada com o recurso a um molde de cartão, que permitiu a disposição das peças de forma sequencial, para verificar o seu ajuste, iniciando-se então o processo de montagem do arco.

A fixação inicialmente concebida, embora estabilizasse as peças, contudo, não produzia compressão, tendo-se verificado que a fixação das peças cerâmicas ao sistema de cabos era pouco eficaz na geração da superfície. Com efeito, a montagem sucessiva das peças produzia um achatamento da superfície na montagem, o que a afastava da forma inicialmente projetada.

Para além das questões do rigor formal que se levantavam, como a discrepância entre a forma projetada e a forma em construção, a peça acarretava igualmente problemas na finalização da superfície, por discrepâncias dimensionais entre os diversos elementos, o que colocava, como bem se compreende, questões no fechamento da superfície.

A conclusão preliminar a retirar é que a simples montagem e fixação das peças cerâmicas ao cabo, não ativava a produção das compressões necessárias, para um funcionamento correto da forma estrutural. A última peça a ser adicionada à superfície, era apenas estabilizada pelo cabo, não sendo sujeita à compressão necessária para o seu posicionamento correto. A sua fixação ao cabo gerava uma compressão decorrente do peso próprio do bloco colocado, o que apenas permitia ativar o atrito na junta de trabalho das peças assembladas. Deste modo embora se assegurasse que as peças não deslizavam, paralelamente estas não atingiam a compressão necessária para que assumissem a sua posição final, como pretendido.

Estas formas estruturais têm como princípio de funcionamento, a produção de compressões ao longo da forma, porém este funcionamento pressupõe uma continuidade da superfície e, caso esta não se mostre concluída, este comportamento estrutural não é ativado.

Este fenómeno é conhecido desde a idade média e fundamentava a construção de arcos e abóbadas, daí que só quando era colocada a *pedra de fecho* é que era retirado o cimbramento desta tipologia estrutural, pois só nesse momento a forma tinha a

continuidade e estava em condições de produzir a compressão contínua, necessária à sua estabilidade estrutural.

A compreensão do fenómeno que informa este tipo de formas estruturais, e que neste sistema não estava a funcionar, permitiu encetar uma pesquisa de soluções, capazes de colmatar o funcionamento do sistema. Nesta sequência, foram encontradas, teorizadas, e testadas, duas soluções.

Uma das soluções passava pela utilização de perfis LT cuja furação permitia o aparafusamento das peças cerâmicas, o que assegurava não só a sua estabilização, como igualmente, o correto posicionamento da peça em função da perfuração do perfil e assim gerar a superfície concebida.

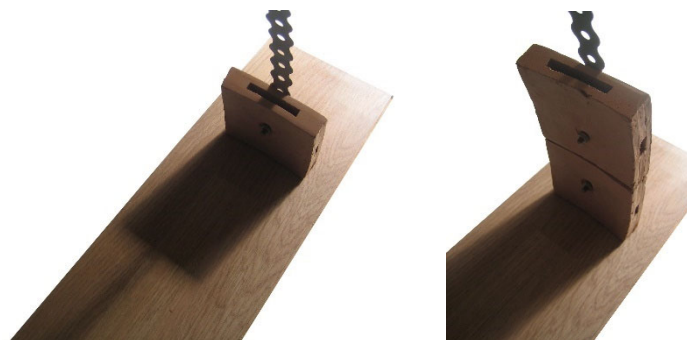


Figura 9.5 – Fixação por aparafusamento do modulo cerâmico à fita LT
(do autor)

Uma outra solução recorria à utilização de ferragens capazes de produzir compressão na peça cerâmica e, deste modo, posicioná-las correctamente.

A utilização dos dois sistemas permitiu concluir que ambos respondiam com eficácia ao problema existente, contudo a solução que resulta da conjugação dos cabos com as ferragens de compressão mostrou-se mais adequada aos modelos cerâmicos já produzidos, revelando uma maior flexibilidade na montagem que o sistema que recorre aos perfis LT, mais difíceis de moldar e conjugar com os módulos cerâmicos.

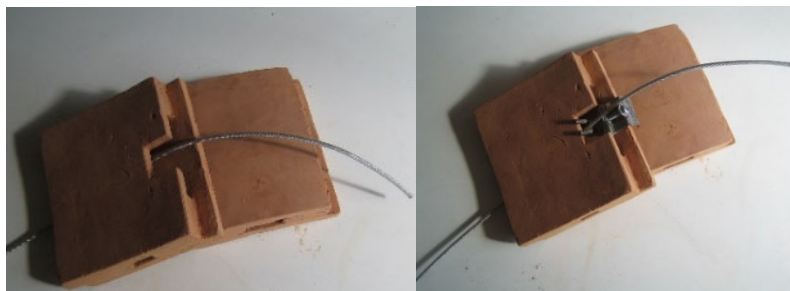


Figura 9.6 – Componentes do sistema, modulo cerâmico, cabo e ferragem de compressão
(do autor)

Com efeito, as peças cerâmicas não acolhiam com facilidade o perfil LT no seu interior e, deste modo a sua montagem tinha que ser feita pelo exterior, a isto acrescentando a necessidade de realizar um trabalho adicional, que consiste em perfurar a peça cerâmica em função da furação do perfil. A tarefa em causa revelava-se assim morosa, além de que se constatou como sendo difícil de realizar, especialmente em outros contextos de trabalho e noutras escalas, designadamente, trabalho em altura).

A resolução deste problema, passou pela adoção de um novo processo de ligação entre os ladrilhos cerâmicos e os cabos de tração, o que implicou a conceção de uma ferragem capaz gerar compressões nos módulos cerâmicos.

A ferragem é fixa ao sistema de cabos através de um cerra-cabos e permite gerar, através de uma rosca, as compressões necessárias para replicar as compressões existentes nas superfícies estruturais já fechadas e a funcionar estruturalmente.

Através deste processo, esta peça foi obtida de uma forma expedita, como resultado da soldadura de um cerra-cabos a uma ferragem de fixação de cubas de água. A peça produzida revelou-se apropriada ao obter os níveis de compressão desejados.

A utilização de cabos permite a utilização de pré-esforço como processo de estabilização da superfície durante o processo de construção. Este sistema permite produzir os níveis de compressão a que a forma estará sujeita, quando já completamente montada e funcionar do ponto de vista estrutural.



Figura 9.7 – Cabo e ferragem geradora de compressão
(do autor)

O caráter, a nosso ver, original do sistema decorre assim da aplicação de um sistema de pré-esforço através de cabos, na produção de superfícies curvas.

A aceitar-se, como parece poder fundadamente defender-se, a validade deste processo, o mesmo resulta intemporal, pois contraria os efeitos decorrentes da gravidade e, se é correto contrapor que os processos de fabricação podem sofrer alterações em função da evolução tecnológica, resulta igualmente inegável que a gravidade e o modo como esta afeta o processo construtivo permanecerá inalterável, pelo que a presença de um cabo pré-tensor (ou sistema equivalente) será sempre necessário para estabilizar a forma durante o processo de construção.



Figura 9.8 –Ferragem de clipagem, variação dimensional
(do autor)

Os cabos, na metodologia sistémica proposta, funcionam como um cimbramento flutuante, tendo precisamente como função evitar a necessidade de elementos de suporte da superfície durante a sua construção ou sejam, os denominados cimbres.

Estes elementos revelam-se de grande importância para a eficiência e competitividade do sistema, pois tornam-no decisivamente mais económico e mais célere na sua construção.

Os cabos apresentam um carácter dinâmico devido à sua capacidade de adaptação formal às cargas a que são submetidos, facilmente ajustando a sua forma ao seu carregamento e, deste modo evidenciando uma grande eficiência estrutural, dado que (e aqui podemos usufruir de uma apreciação incidental de Hengel) a sua estrutura atómica apenas produz trabalho interno esforço normal de tração. (Hengel 1997:63)

Se do ponto de vista estrutural, como já foi explicado (por dispensar cimbramento ou cofragem) a eficiência é máxima, porque a relação peso próprio e carga transportada permite um rácio assinalável) já do ponto de vista formal, esta tipologia estrutural apresenta alguns condicionantes na sua manipulação, uma vez que o seu carácter dinâmico introduz configurações variáveis, do ponto de vista formal, em função da carga a que são sujeitos.

Porém, no sistema agora por nós proposto, e denominado *Brick-warp*, a articulação dos cabos com os módulos cerâmicos permite tirar partido das potencialidades, quer do referido sistema de cabos pré-tensores (que, pela sua flexibilidade e desempenho estrutural confere a estabilidade necessária à construção da superfície, eliminando o momento externo aplicado) quer das peças cerâmicas criadas que, pelo seu comportamento estrutural conferem, e desde logo asseguram, o carácter formal ao sistema.

Desta forma e em sùmula, o sistema funciona da seguinte forma: o peso próprio das peças produz uma rotação descendente (momento externo aplicado) ao passo que o cabo que está confinado dentro das peças, permite assumir a configuração da forma definida pelas peças cerâmicas e, deste modo, a aplicação de tração, gera uma contra rotação, fazendo com que a peça permaneça estável no encaixe dos módulos.

Os cabos permitem colmatar a descontinuidade da forma e garantir os níveis de compressão necessários, para fazer funcionar estruturalmente a superfície, estabilizando-a. Os cabos revelam-se assim essenciais para a definição da superfície, servindo como elemento de fixação dos ladrilhos cerâmicos e evitando assim o descair da forma.

Uma vez compreendido o fenómeno e encontrada a solução, iniciou-se o processo de montagem do arco. No primeiro passo, foi instalada numa base de madeira a peça de arranque da forma e, para a sua estabilização, foi formado um maciço de barro amassado, que se revelou eficaz na resposta aos momentos produzidos pelo peso próprio até ao terceiro nível (fiada) de peças da superfície.

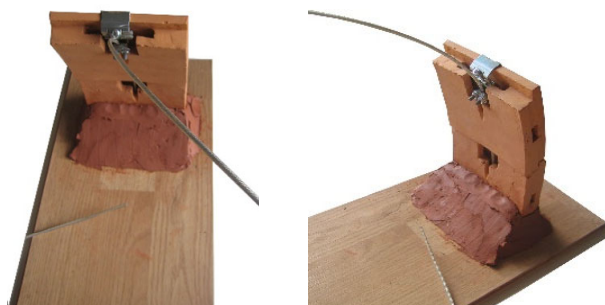


Figura 9.9 – Processo de clipagem, Funcionamento do cabo
(do autor)

As peças cerâmicas que constituem o quarto nível mantiveram a coesão da superfície, contudo, produziram um momento externo que desestabilizou a secção de encastramento, tendo o maciço de barro rompido.

Para contrariar esta realidade, as pontas dos cabos foram fixadas à parede e utilizadas assim para estabilizar os tramos da estrutura, enquanto se procedia à remoção do maciço de barro e se realizava um maciço de betão.

Em função desta alteração, as suas maiores, dimensão e resistência mecânica, permitiram resolver este fenómeno causado pelo peso próprio das peças cerâmicas, pelo qual era produzida rotação no ponto de apoio (momento) incapaz de ser contida pelo material ali aplicado.

O processo de montagem revelou-se simples e rápido e, de igual modo, a superfície gerada apresentava-se coesa e capaz de funcionar plenamente do ponto de vista estrutural.



Figura 9.10 – Ciclo de montagem doo arco
(do autor)

O sistema de construção revelou algumas situações inesperadas como o já referido achatamento da forma concebida, contudo, a compreensão dos fenómenos, permitiu responder com eficácias às adversidades, consolidando o sistema e permitindo que a passagem para uma escala maior se fizesse com maior solidez e eficácia

9.6 Caso prático II

9.6.1 Processo de desenho

O protótipo seguinte tinha agora como objetivo testar, em maiores dimensões, a funcionalidade e eficácia de assemblagem das peças, bem como a fiabilidade do processo construtivo proposto. Com a realização deste segundo caso prático antevia-se também, introduzir os aspetos referentes ao desenho e à manipulação da forma estrutural, através de um processo integrado de representação e fabricação digitais,

articulando a representação assistida por computador – (CAD), com a fabricação assistida – (CAM).

A integração das tecnologias CAD/CAM, como se viu nos dois capítulos anteriores, permite unir o processo de desenho à construção, gerando aquilo a que Kolarevic chama de “*continuo digital*” (2003: 3). Este quadro operativo não só se traduz numa otimização de processos, permitindo a gestão simultânea das várias etapas de projeto, como gera a necessidade de um outro enquadramento mental, para operar com este paradigma tecnológico que resulta de um controlo integrado do processo de análise e do ciclo de produção e construção na fase conceptual (o qual, por sua vez, só resulta possível graças aos processos disponibilizados pelos meios de projeto digital).

A computação revela-se uma ferramenta determinante no processo de geração da forma estrutural, constituindo-se não só como suporte para a manipulação geométrica da forma, mas também para a sua implementação física. Já para a modelação do protótipo foi utilizada uma ferramenta digital (denominada Grassopher) que permite a parametrização da respetiva forma estrutural e que, por isso, possibilitou a articulação com as ferramentas CNC.

O trabalho tinha ainda como objetivo encontrar uma solução passível de ser aplicada a tipologias habitacionais, por se achar que desta opção decorrem diversas aplicações com um elevado potencial de respostas articuláveis para tipologias deste género.

A escolha da dimensão e da flecha do vão do protótipo, teve por base uma contextualização, acima de tudo, funcional, em que se procurou que a medida do protótipo se aproximasse o mais possível de uma realidade projetualmente aplicável.

A contextualização funcional e programática do sistema permite desta forma compreender a sua capacidade de integração em contexto de projeto.

Para efetuar esta avaliação, foi escolhido como paradigma de contextualização de projeto, a unidade habitacional SUDU na Etiópia, realizado pelo BRG – Block Research Group, cumprindo-se deste modo o desígnio da metodologia proposta, pela qual, recorda-se e sublinha-se, se pretende integrar a dimensão construtiva e estrutural no ato de projeto.

No caso presente, esta integração não é feita pela prática de projeto mas, através de uma análise, na qual se estudaram os vãos face à dimensão e flecha, analisando-se

ainda a possível compatibilização deste sistema com os restantes processos construtivos.

A superfície curva gerada teve também como referência dimensional e morfológica o trabalho desenvolvido pelos arquitetos David López e Marta Domènech Rodríguez, uma vez que este grupo está a efetuar uma abordagem analítica às abóbadas catalãs na ETH – Zurique. Deste modo, os dados disponibilizados, referentes à caracterização do material cerâmico e respetivo comportamento mecânico, serviram de referência para a análise e avaliação estruturais realizada através de processos digitais, sendo que esta questão sofrerá ainda uma abordagem posterior.

A construção de um protótipo valendo-se destas analogias permitiu que se beneficiasse da avaliação estrutural feita por estes investigadores, podendo inclusive perspetivar-se num momento posterior a possibilidade de um estudo comparativo entre os dois sistemas de construção.

A avaliação feita permitiu concluir que, com facilidade, o vão e flecha adotados pelo protótipo poderiam ser extrapolados para esta realidade projetual, construtiva e estrutural (SUDU) uma vez que as tensões de compressão verificadas ficavam aquém da tensão de rutura do material, permitindo aumentar o vão, desde que a geometria mantenha a superfície a funcionar exclusivamente à compressão.

Podemos então claramente afirmar que a existência de um sistema construtivo como o proposto teria mitigado completamente, pelo menos nesta área, os problemas colocados durante da construção do SUDU, referidos anteriormente, designadamente, o maior tempo de construção ou a carga horária total a destinar à formação profissional de pessoal para operacionalizar esta forma construtiva curva. Com efeito, este projeto deparou-se com dificuldades na execução das abóbadas por falta de mão de obra qualificada, tendo mesmo que proceder à formação de habitantes locais para viabilizar a sua construção. A adoção do sistema, que aqui denominámos, “brick-warp” pela sua simplicidade permitiria, assim e sem qualquer sombra de dúvida, que a construção das superfícies fosse feitas por mão de obra sem qualificações específicas e num tempo mais limitado.

9.6.2 Análise e avaliação da forma

O paradigma operativo proposto contempla a abordagem à fenomenologia estrutural das superfícies curvas como um dos axiomas operativos do processo ideativo da arquitetura, incluindo ainda no próprio ato e momento da conceção, a análise, o fabrico e, inclusive, a montagem das superfícies curvas e de dupla curvatura.

Pelo facto de o foco do trabalho desenvolvido incidir nos aspetos metodológicos e no processo de construção, bem como pelo carácter do protótipo, e, finalmente, para não existir qualquer dispersão na abordagem à problemática, referida, a abordar, a avaliação desenvolvida no caso prático restringiu-se assim ao funcionamento e comportamento estrutural do sistema em análise.

Contudo, é reconhecido como fundamental e contemplado na metodologia, a utilização de ferramentas de simulação e análise de diversas áreas temáticas, como, acústica, térmica, lumínica, financeira, entre outras.

Estes são elementos de grande relevância no desempenho do artefacto arquitetónico, constituindo-se como uma mais valia no processo de conceção e sendo determinantes na otimização e no desempenho da peça arquitetónica.

No âmbito da avaliação e análise, é ainda dado um especial enfoque aos aspetos estruturais na geração da forma.

Neste aspeto específico, a metodologia adotada suporta-se fortemente no reconhecimento da fenomenologia estrutural, isto é do modo como funciona a estrutura (regressamos ao conceito da gravítica da forma, anteriormente explanado no Cap. IV) como um dos elementos geradores do espaço e da forma, desta forma potenciando a morfogénese (estrutural) e tendo este reconhecimento como determinante, não só na respetiva conceção, como também para a utilização das ferramentas de análise estrutural (como o SAP 2000 e Rhinovault).

Não se pode calcular o que não se percebe e daí que, a compreensão fenomenológica seja, por sua vez, também determinante no cálculo, pois só percebendo o fenómeno estrutural é possível eleger e interagir com a fórmula que nos dará as respostas que procuramos, para a respetiva demonstração.

Uma utilização analítica na base da tentativa erro, alterando empiricamente parâmetros, no sentido de progressivamente melhor viabilizar o comportamento estrutural da forma, torna-se-á num processo labiríntico, algo desprovido de sentido, cujos resultados serão sempre questionáveis, nomeadamente no capítulo da eficiência estrutural.

A compreensão do funcionamento estrutural possibilita desta forma colmatar algumas das lacunas que as ferramentas digitais, e mesmo processos de cálculo apresentam, na análise de superfícies curvas e de dupla curvatura, feitas na maioria dos casos a partir de modelos de análise bidimensional.

Os modelos analíticos para as abóbadas de forma livre, ou para abóbadas catalãs, revestidas com uma lâmina de compressão estão ainda num processo de desenvolvimento.

A primeira situação (abóbodas livres) é comprovada pelos testes efetuados à Free-form Catalan Thin-tile vault realizado na ETH – Zurique, tendo sido efetuados testes de carga para apurar a resistência estrutural da forma, para o que não existem ainda modelos matemáticos que permitam antever e aferir o seu funcionamento e comportamento estrutural. O segundo aspeto (abóbodas catalãs) é atualmente, de acordo com a informação disponível, objeto de trabalho de uma tese designada “*Tile vaults as integrated formwork for concrete shells*” a ser realizada na mesma instituição pelo arquiteto catalão David Lopez, para a qual se colocam os mesmos problemas.

9.6.3 Algoritmo

O Algoritmo definido tem como objetivo o controlo e a definição da superfície, para a qual foi concebido, visando controlar um conjunto de parâmetros definidos por *sliders* os quais conformam um universo formal capaz de expressar as necessidades espaciais e programáticas do projeto. Para tal foi introduzido um conjunto de controladores, que permitem manipular as curvaturas e o vão da superfície.

Partindo de um perímetro de implantação, foram definidos os pontos de apoio da superfície, sendo esses pontos interligados por geratrizes que definem a superfície e que tornam assim, a sua curvatura, passível de ser controlada. Uma vez definida a superfície de entrada, esta tem que se articular com os componentes do sistema, concretamente, os cabos de estabilização e a geometria das peças cerâmicas. O

funcionamento estrutural e a montagem da superfície decorrem da correta articulação entre estes componentes e a superfície pretendida ou expectável.

Como é óbvio, a forma estrutural tem que ser progressivamente preenchida com os módulos cerâmicos, pelo que se torna necessário a sua correta paginação, i.e., a disposição ao longo da superfície. E é esta segmentação da forma que permite traduzir a dimensão dos módulos e a sua direção, aspeto fundamental para a aplicação da teia de cabos estabilizadores.

Estas tarefas podem ser efetuadas manualmente utilizando comandos existentes no Rhinoceros, o que não seria possível efetuar com outro tipo de programas CAD já que os programas mais comuns como o AutoCad revelam limitações na manipulação de superfícies complexas, baseadas nas NURBS, resultantes da manipulação paramétrica.

Ao invés de se gerar apenas uma solução, a utilização do algoritmo permite gerar e testar uma família de formas, pois os parâmetros que definem a forma e a atribuição de diferentes valores permitem gerar ou fasear “famílias” formais em função das diferentes parametrizações, deste modo configurando todo um leque de soluções possíveis. A forma de entrada pode assim ser pensada ou pré-figurada em função da sua área de implantação e dos diversos pontos de apoio possíveis, da superfície, bem como das geratrizes que permite formar e da respetiva articulação.

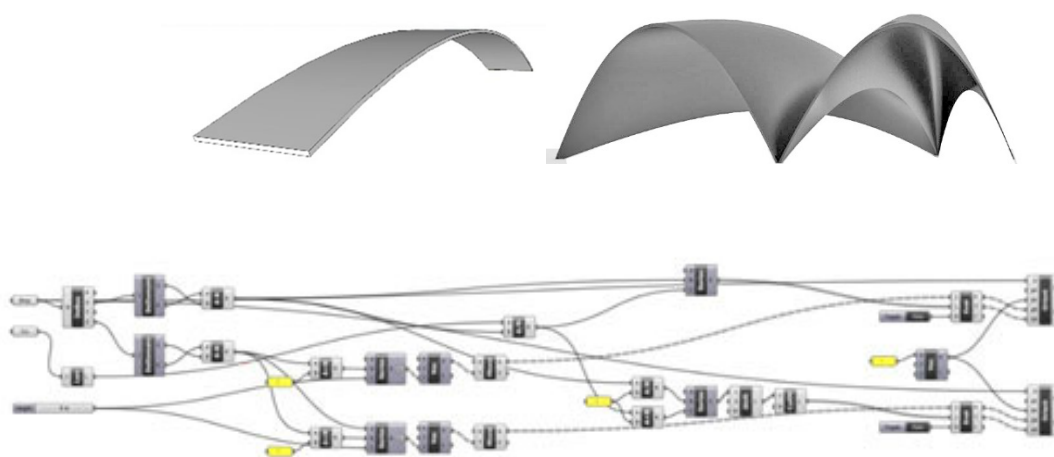


Figura 9.11 – Algoritmo da superfície
(do autor)

O processo de geração das diferentes soluções sem o auxílio do algoritmo exigiria um maior tempo de execução tornando-se uma tarefa extenuante, em termos de repetição e monotonia. A adoção deste processo conceptual permite explorar os princípios estruturantes do universo formal definido pelos parâmetros definidos, permitindo assim encontrar aquela que o arquiteto veja como a melhor solução.

9.6.4 Form-finding e análise estrutural

Como é do comumente aceite, a resistência de uma abóbada resulta de um conjunto de fatores como, geometria, vão, flecha, espessura, entre outros, (vide Cap. IV- V). Para realização da respetiva modelação e análise estrutural foi efetuada uma combinação de ferramentas digitais, tendo sido utilizado um processo de análise através da estática gráfica, o *plug-in* (RhinoVAULT) e por fim a análise de elementos finitos FEM. Estes processos acabam por ser complementares, pelo que a sua conjugação permitiu uma análise com diferentes abordagens.

A estática gráfica apresenta-se como um processo simples que permite compreender de um modo intuitivo e fácil, o funcionamento estrutural da superfície gerada estando, contudo limitada a uma abordagem bidimensional.

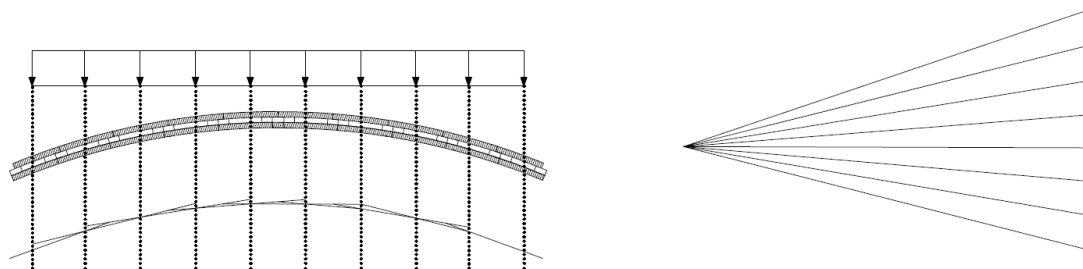


Figura 9.12 – Traçado funicular da abóbada
(do autor)

Este aspeto é porém algo que o RhinoVAULT permite colmatar, pois possibilita uma manipulação tridimensional da forma, permitindo fazer uma gestão adequada das tensões de compressão na forma, o que através de uma análise exclusivamente feita por elementos finitos – FEM, não seria possível.

9.6.4.1 RhinoVAULT

Se a configuração da forma tem implicações no funcionamento estrutural (algo já abordado nesta tese) em contrapartida, o funcionamento da forma é igualmente relevante para o presente sistema construtivo, uma vez que a presença de tensões de tração é indesejável nas formas de alvenaria.

Não obstante a sua simplicidade, a forma foi projetada com recurso ao software RhinoVAULT, o qual permite a criação de estruturas complexas, a funcionar à compressão. Este software foi desenvolvido por Rippmann, Lachauer e Block (BLOCK Research Group) no ETH – Zurique.

Baseado na Thrust Network Analysis (TNA), este software mostra-se capaz de garantir uma forma trabalhando em compressão quando esta está apenas sujeita ao seu peso próprio.

Os grupos de pesquisa, BRG – Zurique e Map13 – Barcelona usam esta ferramenta para a modelação e análise da forma estrutural, a qual mostra ser capaz de produzir formas, que funcionam exclusivamente à compressão. O método permite encontrar formas antifuniculares, em que o envelope formal é geometrizado, através da definição de requisitos gravitacionais específicos, em situações de variação à carga.

9.6.4.2 Método dos elementos finitos

Optou-se pela utilização do software SAP2000, na medida em que este permite definir as propriedades mecânicas do material a utilizar. Ainda, para o presente teste os dados foram extraídos do livro de Megan L. Reese "Análise estrutural e avaliação das abóbadas de Guastavino", também referenciados pelo trabalho de David López e Marta Rodriguez (Tabelas 9.1 e 9.2) servindo estes de modelo para a análise efetuada.

Young's Modulus: E	7400	Mpa
Poisson's Ratio (ν)	0,26	
Density (ρ)	17,64	kN/m ³

Tabela 9.1 – Resultados dos testes de materiais (Atamturktur, 2006: 119)

(Guastavino Vaulting: Past, Present, and Future, 2012)

Compressive Strength, 5-day	14,19	N/mm ²
Compressive Strength, 360-day	22,67	N/mm ²
Tensile Strength	1,98	N/mm ²
Transverse (Bending) Strength	0,62	N/mm ²

Tabela 9.2 – Resultados dos testes obtidos por Gustavino (1892: 58-59)

(Gustavino Vaulting: Past, Present, and Future, 2012)

Deste modo, para uma abóbada de 3 m de vão com uma flecha de 0,30 m e uma espessura de com 0,05 m, a análise gráfica feita para uma carga uniformemente distribuída de 2KN, permite verificar que a linha de impulso fica dentro da seção da abóbada, garantindo-se deste modo a sua estabilidade.

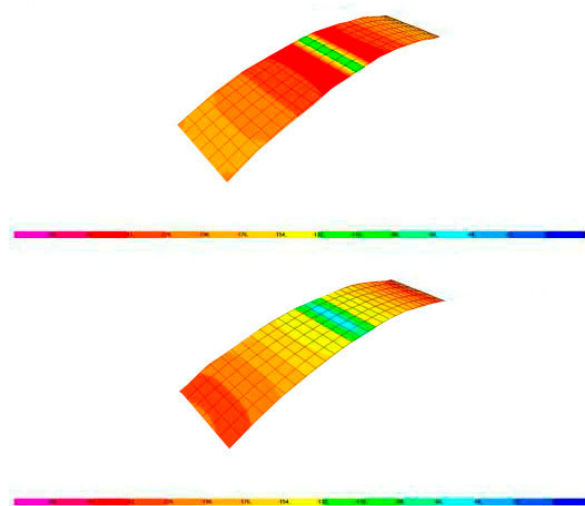


Figura 9.13 – Análise estrutural feita com elementos finitos

(Engº Bruno Semendo)

Através da análise feita pelos FEM constata-se que as tensões são muito baixas em relação àquelas a que o material pode resistir, variando ao longo da espessura da seção (correspondente exatamente aos valores dos lados superior e inferior do modelo 3-D). Deste modo, se fizermos uma média dos valores de tensão na espessura da seção, podemos verificar que as tensões médias serão em torno de 0,2 N/mm²

Com o aumento da carga uniforme distribuída para 5 KN e 10KN, a linha de impulso encaixa-se naturalmente na seção da abóbada, o que nos permite concluir assim linearmente que a respetiva estabilidade está consequentemente garantida enquanto o material resistir. Porém, um forte incremento de carga nas abóbadas, requer atenção aos movimentos nos suportes, uma vez que os impulsos horizontais são consideravelmente altos.

A aplicação de uma carga concentrada de 3 KN produz uma linha de impulso que não se encaixa na secção, colocando problemas de estabilidade. Neste contexto, é ainda verificável que as tensões de compressão e as tensões de tração são aproximadas, o que também não é benéfico, pois o sistema construtivo apresenta dificuldade em responder às trações (relembra-se que alguns autores, cautelarmente, recomendam a não existência de trações, em absoluto).

Em resumo, a carga uniformemente distribuída apresenta-se mais estável desde que os impulsos horizontais estejam controlados e, das cargas uniformes, a que apresenta melhor estabilidade é a de 2KN/m².

Sendo certo que o uso de cargas concentradas se revela desfavorável nesta tipologia, existem, contudo, discrepâncias entre os modelos virtuais em que a carga é expressa por um vetor colocado num só ponto, já os testes de carga não apresentam o mesmo grau de concentração, uma vez que resultam de recipientes com 30 cm de diâmetro com 25 Kg de carga, cada um.

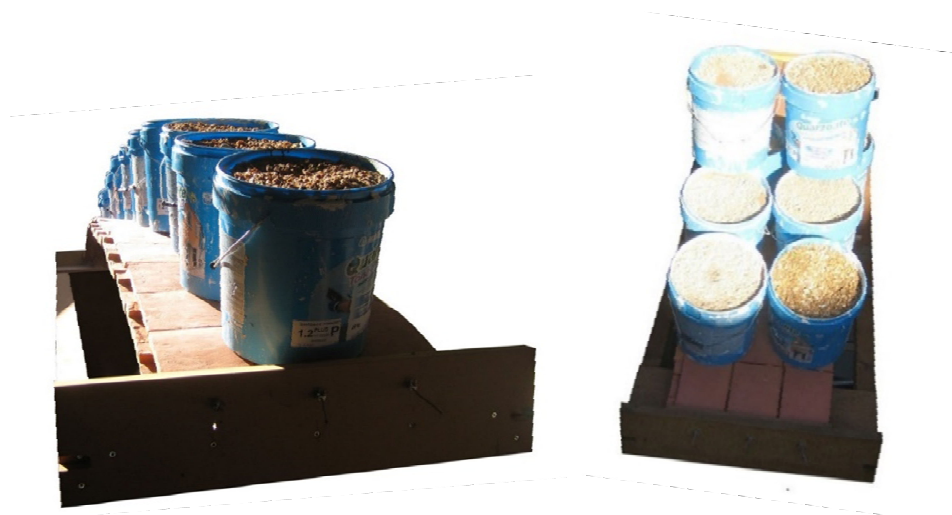


Figura 9.14 – Testes de carga
(do autor)

9.6.5 Tecelagem ou paginação e numeração das peças

As ferramentas de desenho digital (grasshopper) permitiram não só manipular a geometria da superfície, como também estabelecer uma relação geométrica entre a superfície gerada e as estereotomias dos módulos de cerâmica pré-fabricados. Uma vez gerada a superfície, esta é segmentada em função da forma e da dimensão das peças cerâmicas.

Deste processo designado por *tesselation*⁵⁶ (tecelagem e paginação) resulta a personalização da geometria das peças cerâmicas. Através de um processo que é em simultâneo geométrico e dimensional, a tecelagem articula a geometria e dimensão da superfície e a geometria e dimensão dos módulos cerâmicos, definindo o seu talhe. A articulação da superfície com os módulos, faz-se pela divisão da superfície em partes, cuja dimensão resulta diretamente da métrica dos módulos.

Este processo apresenta um carácter qualitativo, porque é em função do caminho da força ao longo da superfície que a estereotomia é gerada. Por exemplo, se na junta de trabalho junto aos mosaicos, estes não estiverem perpendiculares à força, não será gerada compressão na junta, mas um deslizamento.

O referido processo tem pois que ser capaz de gerar novas estereotomias em função de novas formas, não resultando aquelas da gestão dos sliders ou da alteração de controladores e parâmetros (de modo a produzir variações dimensionais de uma mesma superfície, i.e., vãos) mas de alterações do peso próprio e da configuração da superfície, das quais resultam alterações na direção do caminhar da força.

A estabilização da forma durante o seu processo de montagem decorre da interação dos padrões gerados no processo de tecelagem e da teia de cabos. Para que não existam deslizamentos das peças durante a sua construção, os cabos devem seguir o fluxo de forças gerados pela forma para, deste modo conseguirem reproduzir durante a montagem os níveis e os e os padrões de compressão da forma.

⁵⁶ Esta expressão pode ser traduzida para Português por tecelagem, contudo esta palavra apenas expressa a operação de tecer, fabricar, manufaturar tecidos, a tradução não expressa o sentido de direção que o étimo inglês apresenta e expressão, neste caso seria necessário utilizar a palavra paginação, designação para o modo como são dispostas as peças cerâmicas.

9.7 Processo de fabricação

O processo de fabricação definido e expresso no quadro operativo integra componentes da condição mecânica e da condição digital, tendo sido deste modo possível otimizar o processo de fabricação e construção da forma.

A adoção de módulos estandardizados personalizáveis permite diminuir o tempo e os custos de produção. O recurso à produção em série permite baixar os custos inerentes à fabricação dos módulos cerâmicos, já que estes necessitam apenas de uma pequena personalização para poderem ser aplicados a cada caso concreto – *mass customization*. Esta abordagem rompe com a lógica dos processos de fabricação digital (aditiva ou subtrativa) que produzem toda a peça, consumindo assim mais tempo e no caso dos processos subtrativos gerando uma enorme quantidade de desperdício.

9.7.1 Moldes

A implementação do protótipo com 3m de vão implicou a manufatura de um maior número de peças queas utilizadas para produzir o arco. Pela quantidade expressiva e pela sua a complexidade foi necessário encontrar um processo de produção mais eficiente que o utilizado anteriormente, mas que se ajustasse aos meios tecnológicos disponíveis e utilizáveis num caso de estudo, a nível de investigação académica.

A configuração dos módulos cerâmicos revelou que apenas seria possível definir um tipo de resposta adequada através de um sistema de modelação. Foi, contudo, necessário ponderar entre as diversas opções em presença para encontrar a solução mais adequada, dado que existem várias técnicas de modelação. Numa primeira fase colocou-se a possibilidade de utilizar um sistema de moldagem através de taceiros de enchimento recorrendo à barbotina,⁵⁷ já que as exigências na manufatura dos taceiros, para a técnica de enchimento, são bastante menores que para outras técnicas de modelagem por prensagem. Esta tecnologia apesar de eficiente não dava resposta às

⁵⁷ Pasta cerâmica líquida, à base de argila e água utilizada para produzir peças cerâmicas utilitárias.

necessidades estruturais do sistema, pelo que houve a necessidade de adotar outra técnica de moldagem.



Figura 9.15 – Tacos de prensagem
(do autor)

O processo tecnológico adotado utilizou moldes de prensagem. Como esta técnica requiere tacos de grande resistência, para suportar as tensões geradas no ciclo de prensagem, deste modo não apenas o gesso para a execução dos tacos é mais resistente, como igualmente o molde tem que conter reforços, para resistir às tensões.

A construção dos tacos inicia-se com a execução de uma peça cerâmica que irá servir de molde, a qual dada a sua complexidade foi simplificada pois seria impossível realizar a sua moldagem de um modo direto.

Após uma análise do molde, foi decidida a configuração da “cama”, a formalização da qual é de importância relevante, pois a mesma tem por função suportar o molde durante a manufatura, bem como definir a configuração dos tacos, deste modo condicionando a articulação dos dois tacos que constituem o molde, para além do modo como a prensagem seria feita.



Figura 9.16 – Primeira fase de produção dos tacos
(do autor)

A peça deve encaixar com grande precisão na “cama”, a qual serve de base para a realização de uma caixa que recebe o gesso, assim se formando os tacelos que constituem o molde de prensagem.

As tensões a que os tacelos são submetidos obriga à utilização de reforços, tendo por este facto, sido adotada a utilização de rede metálica e a mistura de fibras de sisal no gesso.

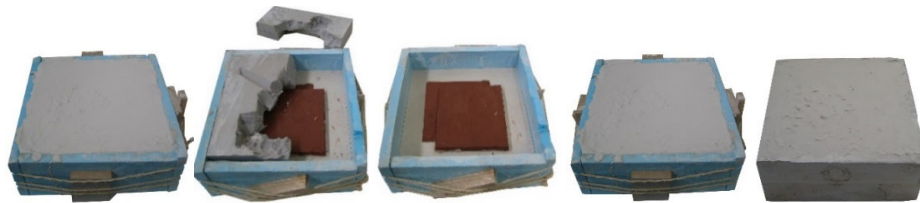


Figura 9.17 – Segunda fase Produção dos tacelos
(do autor)

Como cada tacelo corresponde a uma fase de enchimento, o primeiro tacelo resulta assim do enchimento do espaço vazio deixado pela “cama” pelo que após o processo de cura do gesso que forma o tacelo, é necessário remover a cama que suportou o primeiro ciclo de produção do molde.

A segunda fase resume-se ao enchimento da restante parte da caixa, processo esse que irá produzir o segundo tacelo pelo qual se formará o molde de prensagem. Após a secagem é removida a caixa que serviu para a formação dos tacelos e aberto o molde de prensagem, sendo daí retirado o molde cerâmico que esteve na base na modelação dos dois tacelos.

A escolha de uma superfície parabólica tem implicações no processo construtivo pois, atendendo ao facto de não existir um raio comum a todas as peças, estas sofrem variações na sua curvatura em função do seu posicionamento na superfície. Com vista a obstar esta situação foram construídos 3 tacelos com curvaturas diferentes para que o ajuste a efetuar nas juntas fosse mínimo e assim fosse viável a diminuição do tempo de maquinagem, bem como dos desperdícios decorrentes do processo subtrativo. Finalmente, foram ainda aumentadas as dimensões dos módulos cerâmicos com vista a diminuir a quantidade de peças envolvidas na construção da forma.

9.7.2 Manufatura dos módulos cerâmicos

O primeiro momento da prensagem inicia-se com o enchimento dos tacelos. Nesta fase, a pasta cerâmica é aconchegada de modo a que se não formem bolhas de ar, uma vez que estas, durante o processo de cozedura, iriam provocar danos na peça.



Figura 9.18 – Tacelos de prensagem
(do autor)

Após este enchimento, o excesso de barro é retirado através da prensagem, processo que foi realizado com a ajuda de grampos de marceneiro.



Figura 9.19 – Pressagem das peças cerâmicas
(do autor)

A extração da peça cerâmica moldada só se faz após algum tempo, pois que o repouso da pasta dentro dos tacelos se revela essencial, dado que serve para que a superfície da peça perca água e assim possa ser extraída de um modo mais facilitado.

A peça, uma vez retirada do molde, necessita de ser terminada, uma vez que, pelo facto de ser constituída por duas camadas, a sua complexidade não permite que a sua manufatura decorra de um só processo. Torna-se assim necessário associar outra técnica capaz de produzir os vazios necessários para a respetiva conclusão.



Figura 9.20 – Processo de vazamento do modulo cerâmico
(do autor)

O inteiro das peças cerâmicas é vazado através da utilização de cortantes conduzidos por guias e, uma vez concluído este processo, a modelação da peça esta concluída.

9.7.3 Secagem dos módulos cerâmicos

O processo de secagem revestiu-se de particulares cuidados, tendo sido efetuado em ambiente controlado, sobretudo no que concerne ao fluxo de ar, variações bruscas de temperatura ou de humidade, pois só desta forma, a secagem permitiria baixar o teor de água sem o aparecimento de deformações ou fissuras, assim se garantindo a qualidade das peças.

A evaporação da água de capilaridade resultante do amassamento da pasta cerâmica, torna as peças consistentes, permitindo a manipulação em segurança das mesmas.

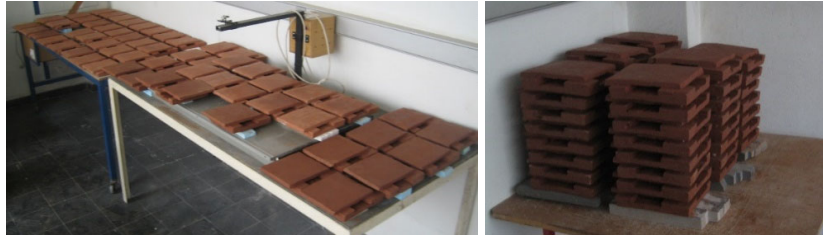


Figura 9.21 – Secagem das peças cerâmicas
(do autor)

9.7.4 Customização dos módulos cerâmicos

O desenho do ciclo produtivo facilmente permite a utilização da produção em série, com isso diminuindo os custos de produção que lhe são inerentes, assegurando poupança com a adoção de economias de escala. O módulo necessita apenas de uma intervenção mínima visto a peça já estar produzida, de modo que o ajuste se destina apenas a personalizar a estereotomia da peça. É assim possível conjugar a produção digital com a produção mecânica e esta com a customização, pois a respetiva articulação potencializa a solução.

A personalização da estereotomia das peças cerâmicas apresenta vantagens em relação a outros materiais, dado que o ciclo de fabricação dos módulos, considera o material e as suas características, além disso, lidando com os fenómenos de secagem e cura do material, permite em função dos mesmos, gerir o processo de modo a que o talhe (de que resulta a customização) seja efetuado antes da cozedura de chacota em que a peça é cozida a 900°C (chacota).

As peças apresentam assim um grau de dureza menor, diminuindo deste modo o tempo de utilização das CNC, o que não acontece com outros materiais que só poderiam sofrer esta transformação após a cura estar completa.

Deste modo é possível diminuir os custos e o tempo decorrentes da fresagem e, além disso, por os resíduos da fresagem, não terem sido submetidas ao processo de cozedura, podem ser facilmente reutilizados na produção de outras peças. Esta gestão do ciclo de produção torna o sistema particularmente competitivo, para além de sustentável, em ambos os casos pela facilidade de gestão e reutilização de quaisquer resíduos, assim limitando desperdícios.

A customização antes da cozedura, permite reduzir os riscos, uma vez que o estado em que o material se encontra permite acolher este processo com menos danos para a peça. Em caso de quebra, os custos são menores, dado que não são imputáveis à peça os custos decorrentes da cozedura.

As ferramentas CNC funcionam a partir de ficheiros 2D (ficheiro dxf)⁵⁸, nos quais os perfis da peça estão desenhados, sendo estes utilizados para controlar o sistema de corte e, assim, talhar a peça.

As peças apresentam uma configuração tridimensional, deste modo é necessário convertê-las de modo a que o corte fique contido num plano definido em XY, podendo a partir daí, proceder-se à fresagem em função deste referencial espacial.

O processo de talhe foi definido em função da definição da curvatura que a peça apresenta, tendo sido produzidos três ciclos de fresagem diferentes em função dos três tipos de peças produzidas.

Num segundo momento é gerado um rótulo de identificação, de acordo com a sequência de montagem previamente definida. Estes passos revelam-se de uma importância extrema, pois o sucesso do ciclo construtivo depende de uma articulação perfeita dos módulos

A existência de uma rotina permite a preparação dos ficheiros de suporte para a realização do corte de personalização dos módulos. Através da referida rotina consegue estabelecer-se uma diferenciação entre as linhas de corte a serem produzidas nas peças e a gravação dos números dos módulos. Esta distinção é expressa através de um sistema de organização de layers, em que cada tarefa é individualizada através de uma layer específica, executável por uma máquina CNC que as identifica e diferencia em termos de procedimento, realizando as tarefas aí expressas em etapas distintas.

O processo inicia-se pela maquinagem das peças, personalizando a sua geometria e subsequente gravação dos rótulos.

A fresa utilizada permitiu uma maquinagem em 2D e meio, o que implica que a peça tenha que ser reposicionada durante o processo de fresagem. Este facto colocou alguns

⁵⁸ Os ficheiros DXF são disponibilizados na gravação de ficheiros pelos programas CAD, sendo processados e traduzidos pelos pós-processadores para ficheiros ISSO (G-CODE) lidos pelas máquinas CNC durante o processo de fabricação.

problemas de precisão no talhe das peças, tendo sido necessário criar uma referência na peça e no plano de fresagem para que o corte se tornasse mais fiável.

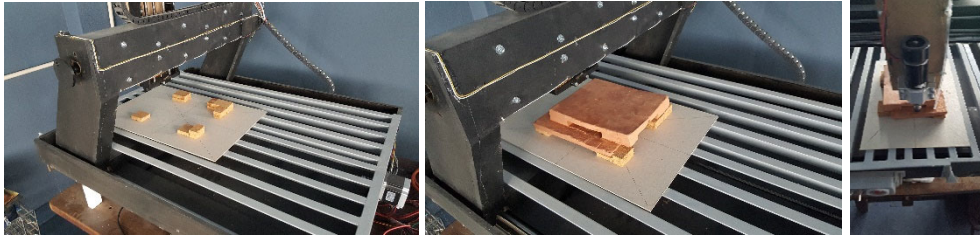


Figura 9.22 – Processo de fresagem das peças cerâmicas
(do autor)

Idealmente, seria de utilizar uma fresa 3D ou, mesmo um braço robótico, com fresa acoplada, procedimento que aumentaria, como se depreende, o rigor do talhe, bem como o tempo de execução, contudo, as limitações académicas, para além de não exigirem no caso concreto, semelhante rigor, são por todos conhecidas.

9.7.5 Verificação das peças

As peças após a fresagem foram montadas sobre um suporte de ensaio, para aferir o encaixe das respetivas juntas, as peças foram verificadas uma a uma de modo a que qualquer discrepância com o plano de talhe traçado pudesse ser retificada antes da cozedura.



Figura 9.23 – Montagem da abóbada sobre o suporte de ensaio
(do autor)

Este teste, porque implicou a montagem integral da abóbada, revelou-se útil pois foi possível ajustar algumas das peças que apresentavam pequenas discrepâncias. O material e o ciclo de trabalho criado conferiram tolerância ao processo, evitando desperdícios. Estas verificações decorrem do ciclo de fresagem ter sido feito em duas etapas, obrigando a um reposicionamento da peça.

Os sistemas de junta seca apresentam menor tolerância que os processos que envolvem a utilização de argamassas na junta de trabalho das peças. Por outro lado, a verificação das peças, antes de serem montadas, permite evitarem-se situações mais difíceis de resolver em fase de construção, tais como a décalage ou desfasamento construtivo.

9.7.6 Cozedura dos módulos cerâmicos



Figura 9.24 – Mufla de cozedura
(do autor)

A cozedura das peças revestiu-se de alguns cuidados, para que este processo não resultasse na deformação das mesmas; estas foram dispostas na mufla (forno para cozedura, a temperaturas entre 200 a 1400 C) em camadas, de modo a que o peso exercido não as deformasse durante o processo de cozedura.

A programação do ciclo de cozedura foi igualmente tida em conta, tendo sido escolhido um ciclo de cozedura mais longo, com uma gradação de temperatura mais suave para que as peças tivessem uma cozedura mais lenta, diminuindo as deformações e ruturas, que pudessem resultar de possíveis bolhas de ar existentes na pasta cerâmica.

Nesta área, utilizou-se o como referência o trabalho teórico de Maria Canotilho, presente na investigação desenvolvida por esta sobre os Processos de cozedura em cerâmica.

O ciclo inicia-se no patamar dos 110°C, tendo como objetivo a evaporação da água de capilaridade e amassamento.

Entre os 400°C e os 800°C, constata-se a perda de água de constituição, verificando-se uma combustão da matéria orgânica que constitui a pasta; por sua vez, a pirite é decomposta em óxido de ferro Fe_2O_3 e os hidróxidos são decompostos, transformando-se em quartzo.

Entre os 800°C e os 950°C, verifica-se a calcificação dos carbonatos e a decomposição dos sulfatos, sendo que a partir dos 950°C se inicia a *sinterização* que resulta numa maior coesão e resistência das peças cerâmicas, enquanto reação às altas temperaturas de alguns dos constituintes das argilas, formando-se um líquido à base de sílica (vidro) que aglomera as partículas menos fundíveis, após o arrefecimento, resultando numa maior dureza, resistência e compactação da peça. (Canotilho, 1999: 33-37)⁵⁹



Figura 9.25 – Módulos cerâmicos
(do autor)

As propriedades de um artigo cerâmico dependem da quantidade de “vidro” formado, que será ínfima nos tijolos comuns e grande nas peças de porcelanas.

⁵⁹ Canotilho, Maria, 2003, *Processos de cozedura em cerâmica*, Instituto Politécnico de Bragança · 2003

9.8 Montagem

O processo de montagem deste sistema difere grandemente do tradicional processo de montagem das formas geridas por esforços de compressão. No sistema proposto a função desempenhada pelo cimbramento é desempenhado por cabos de estabilização, aqui chamado de cimbramento flutuante, o que dispensa a utilização de andaimes ou cimbres, permitindo uma redução significativa de custos e de tempo de montagem.

Durante o processo de assemblamento a estabilização dos blocos cerâmicos é feita por cabos que produzem a compressão necessária, não só para que estes se mantenham imóveis, mas também para assegurar o rigor da forma final.

A assemblagem das peças que constituem as superfícies assemelha-se em muito ao processo de construção das abóbadas de junta seca da Idade Média, contudo ao contrário desse processo, o sistema construtivo agora proposto substitui o cimbramento por uma teia de cabos de estabilização. Esta abordagem tectónica revela-se mais eficiente na fase de construção e seguramente mais flexível.

A montagem do protótipo acarretou a criação e construção de uma bancada de montagem, a qual contempla dois apoios que não só suportam o arranque da abóbada como também a estabilizam. Os impulsos horizontais da forma estrutural, identificados na análise estrutural feita previamente, são contemplados nesta plataforma através de dois prumos que impedem este movimento (cfr. infra, Fig. 9.26).

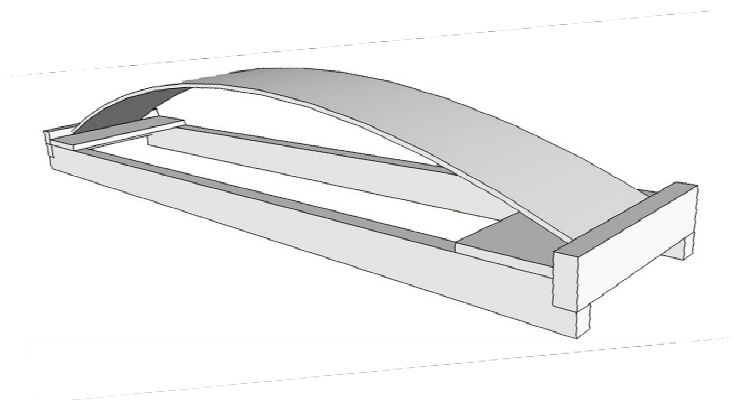


Figura 9.26 – Plataforma de suporte concebida para o sistema brick-warp
(do autor)

A numeração dos blocos permite o seu correto posicionamento do qual resulta o funcionamento estrutural adequado da forma estrutural. Os módulos são colocados manualmente e fixados por grampos estabilizadores.

Face à experiência obtida como o primeiro protótipo houve um maior cuidado com o as peças do primeiro nível da abóbada, as quais foram fixas de modo a dar resposta ao momento externo produzido pelo peso próprio das peças.

No sentido de minimizar este fenómeno, que dificulta a montagem da superfície, foram efetuadas as cinco primeiras fiadas da abóbada, nível que se revelou crítico neste primeiro protótipo para a estabilidade da superfície junto aos apoios. Como resposta, foi adotada uma estratégia que passa pela construção de um arco, de modo a que este sirva de apoio para os restantes (arcos) que compõem a superfície.

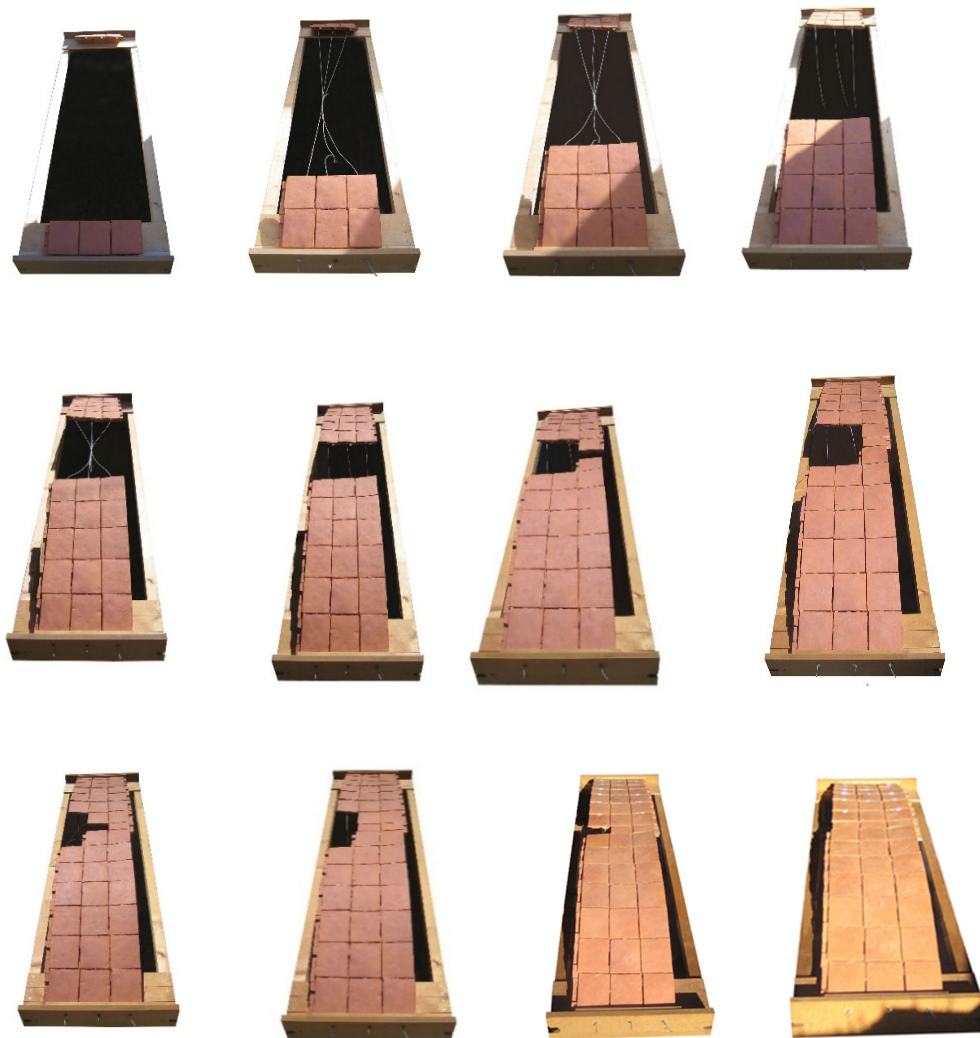


Figura 9.27 – Ciclo de montagem do sistema Brick-warp
(do autor)

9.6.14. Logística de produção

O ciclo de produção deste sistema construtivo implica a utilização de diferentes meios técnicos com diferentes índices tecnológicos, não sendo comum que estes meios estejam todos localizados num único espaço.

Os módulos são produzidos numa oficina cerâmica através de moldes de prensagem, sendo efetuada numa fase subsequente a customização e rotulagem através de

máquinas CNC, normalmente disponíveis em laboratório de fabricação digital, e por fim a cozedura da peça é feita novamente numa oficina.

As unidades de produção cerâmica não dispõem normalmente de ferramentas CNC, pelo que o desfazendo espacial, dos meios de produção necessários para fazer face ao ciclo de manufatura pode ser uma realidade. Contudo a dimensão e peso dos módulos permite um fácil transporte, não sendo este um óbice do sistema.

Esta cenário pode sobrecarregar o ciclo de produção com um excesso de tarefas relacionadas com o transporte das peças. Este facto não só se revela desvantajoso por onerar os custos e o tempo de produção, como também pelos impactos decorrentes do transporte, e dos riscos inerentes à deslocação de peças cerâmicas que ainda não sofreram a cozedura de chacota.

A gestão das infraestruturas necessárias para a sua fabricação é determinante para a otimização do ciclo de produção. Esta desvantagem pode ser facilmente superada através da junção destas tecnologias num espaço único, de modo a otimizar os processos de produção, algo que já é aliás feito noutra as tipologias de atividades, como a conceção e fabricação de embalagens de produtos alimentares, inclusive em outsourcing.

A montagem do sistema é efetuada *in situ*, beneficiando esta etapa do trabalho desenvolvido pelo laboratório de fabricação digital, assim tornando a montagem mais rápida e eficaz. A qualidade do trabalho desenvolvido no Fab. Lab. é decisivo para todo o processo de construção dado que o rigor de produção das peças cerâmicas influência decisivamente a configuração da superfície a ser produzida.

Capítulo 10 – Conclusão

O presente capítulo pretende, em primeiro lugar, sumarizar e expressar os aspetos conclusivos respeitantes à investigação desenvolvida ao longo da tese, através das hipóteses colocadas em função dos problemas constatados, de seguida, elencar os contributos científicos do trabalho desenvolvido e, por fim, apresentar possíveis linhas de evolução, para a investigação agora produzida.

10.1 Sumário

10.1.1. Objetivos gerais

A problematização desenvolvida na introdução da tese, permitiu formular dois objetivos de carácter geral, os quais expressam a necessidade da existir de uma metodologia adequada às especificidades das formas curvas, bem como um sistema construtivo capaz de materializar estas formas. Estes objetivos pautaram em grande medida o ciclo de investigação. No sentido de atingir as metas aí propostas, foram enunciadas as correspondentes hipóteses explicativas (1 e 2) designadamente, a criação de uma metodologia, bem como de um sistema construtivo para superfícies curvas e de dupla curvatura que, consequentemente, foram sendo trabalhadas ao longo da tese.

Os resultados produzidos pela investigação demonstraram ter sido possível abordar com sucesso os desafios colocados relativamente à manipulação da geometria, concretamente na construção das referidas, através da aplicação de uma metodologia capaz de articular as várias etapas de conceção e construção.

O recurso ao quadro instrumental definido pelas ferramentas digitais CAD/CAM, permitiu definir um paradigma operativo e assim perspetivar construir-se a custo mais baixo e em menor tempo, este universo formal, tornando-o passível de maior presença no mercado, deste modo considerando-se contribuir para o enriquecimento conceptual no panorama arquitetónico contemporâneo, já para não falar dos benefícios inerentes à eficiência intrínseca daquelas formas.

Para satisfazer os objetivos gerais foi necessário debruçarmo-nos sobre diferentes áreas de conhecimento, articulando **Teoria da arquitetura** (Ensaio da razão

compositiva) com **Fenomenologia estrutural** (gravítica da forma) ainda ambas com a área das **Tecnologias digitais de Computação** (considerando-se aqui a aplicação da tecnologia na arquitetura) e atender finalmente à **Tectónica** (i.e., aos processos respetivos de produção).

Os conhecimentos adquiridos mediante a articulação de todas estas áreas foi servindo simultaneamente de baliza e fundamento para o crescimento científico da tese, gerando simbioticamente um paradigma operativo para a aplicação das tecnologias digitais na arquitetura e um sistema construtivo adequado à construção de formas curvas e de dupla curvatura. Estes elementos constituem a matéria científica relevante da tese.

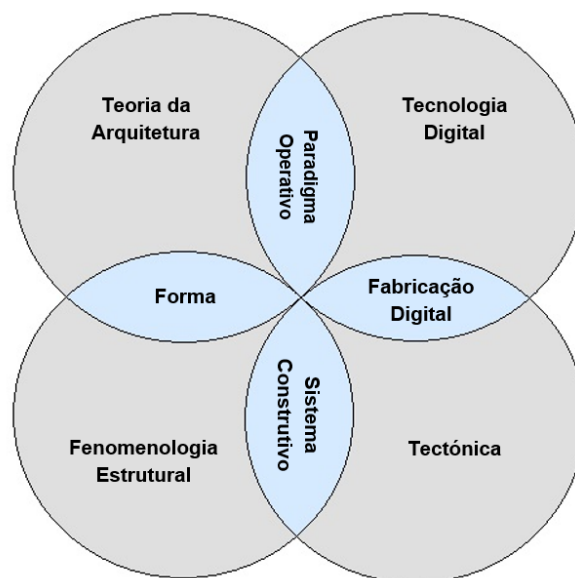


Figura 10.1 – Esquema da investigação
(do autor)

10.1.2 Teoria da arquitetura v.s. Tecnologias digitais

A prática de projeto deve ser suportada por um lastro teórico capaz de acolher e potenciar a criatividade, bem como plasmar a abrangência que o ato ideativo abarca. A existência de princípios capazes de balizar a prática de projeto, confere ao arquiteto uma maior solidez conceptual.

A milenar tríade definida por Marcus Vitruvio (firmitas, utilitas, venestas) revela-nos uma visão abrangente e integrada que mantém ainda hoje uma validade inquestionável, na medida em que a sua atualidade encontra eco na lógica holística expressa pelo “continuo digital” proposto por Kolarevic, o qual enuncia o quadro instrumental que articula as ferramentas digitais CAD/CAE/CAM.

Os dois conceitos apresentam uma visão abrangente da prática da arquitetura, potenciando uma prática de projeto integrado, que extrapola o momento compositivo e exige a articulação com a tectónica.

Nesta mesma linha encontramos o *Ensaio da Razão Compositiva*, no qual Mahfuz problematiza a prática de projeto a partir do lugar, programa e técnica. A sua teoria de projeto, foca-se na passagem do plano conceptual para o plano material, fazendo assim emergir a dimensão tecnológica no processo conceptual.

O projeto tem por base um carácter operativo suportado pelo método, no qual o arquiteto apresenta, mesmo que inconscientemente, hábitos e procedimentos mentais e geométricos, pelo que o pensamento produzido pelo conhecimento pode por isso ser ordenado e estratificado por ciclos e níveis de interação, que encontram nas ferramentas digitais um meio, simultaneamente de interpretação e de expressão. Deste modo, pode acompanhar-se Rocha e altri, quando concluem que:

“Admitindo-se...” que “projetar...” seja “o ato de idealizar, inventar, imaginar o objeto que ainda será construído....na” ótica arquitetónica, projetar é um ato criativo não verbal. Projetar é a invenção metódica, sistemática, crítica, tecno-científica do edifício a ser construído e da plástica da obra.”(Rocha & Pinheiro, 2006: 2)⁶⁰

Ora, a energia da criatividade necessita da potência da metodologia para conferir solidez projetual à peça arquitetónica. Deste modo, o “*continuo digital*” e o *Ensaio da Razão Compositiva* fornecem o enquadramento para que a criatividade seja

⁶⁰ Rocha. Jr., Pinheiro. Daniel– (2006) ADOÇÃO DO PARTIDO NA ARQUITETURA <https://pt.scribd.com/document/177033668/A-ADOCADO-PARTIDO-NA-ARQUITETURA>

consequente e não se traduza numa especulação frágil, incoerente entre si ou desajustada aos desígnios de projeto.

A aplicação das tecnologias digitais à arquitetura formalizada pelas ferramentas CAD/CAE/CAM decorre da evolução da computação e da matemática que a suporta, e a sua aplicação à arquitetura.

Neste contexto urge compreender a evolução da computação, e a sua contextualização na arquitetura. Para Kostas Terzidis é ainda importante a diferenciação entre o conceito de computar e computadorização.

A Computorização “é *automação, mecanização, digitalização e conversão*”, já a computação “é a exploração do indeterminado, do vago, de processos mal definidos” (Terzidis, 2006: xi).

A aplicação destes conceitos à arquitetura e mais particularmente à representação/desenho produz resultados e processos conceptuais distintos. A aplicação dos princípios da computadorização ao desenho, apenas digitaliza o processo tradicional de desenho, introduzindo, contudo, maiores níveis de produtividade (Schodek, 2005: 182) ⁶¹.

A evolução dos vários ramos da matemática possibilitou a criação dos conceitos que culminaram na materialização do computador e nas linguagens de programação responsáveis pela computação, bem como nos conceitos geométricos que operacionalizam a manipulação da forma.

Este processo evolutivo ter-se-á iniciado esta fase com Euclides (séc.III a.c) que utiliza os princípios da lógica Aristotélica para estabelecer um modelo axiomático, que resultou na base da geometria euclidiana. Com efeito, Aristóteles, ao teorizar sobre a infraestrutura da Matemática, a que chamou *Organon* (*e que nada mais é do que o que modernamente chamamos Lógica*) define 4 axiomas, enunciando-os como: “o homem é”; “o homem não é”; “o não homem é”; “o não homem não é” criando assim *ex novo*, o que hoje chamaríamos de *lógica binária*. Este modelo suportou o aparecimento do primeiro computador analógico, o mecanismo Antikythera, em 60 A.C.

⁶¹ Schodek, Daniel; Bechthold, Martin; Griggs, Kimo; Kao, Kenneth Martin & Steinberg, Marco (2005): *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken;

O algoritmo é uma das bases da computação decorrente do desenvolvimento do ramo da matemática designado por álgebra; embora a definição do primeiro algoritmo seja ambígua. A análise etmológica leva a considerar ser o criador deste conceito, Al-Khwarizmi (Mohamed ben Musa Al-Khwarizmi) um dos mais célebres matemáticos, de todos os tempos, de origem persa, nascido no Séc. IX, e cuja obra principal, traduzida no séc. XII, para Latim, foi denominada “Algorithmi de numero indorum” tratando da utilização de algoritmos respeitantes ao uso do sistema decimal, este ainda mais antigo e de origem indiana (lembra-se serem estes os “inventores” do Zero, sem o qual a matemática moderna nem seria possível).

A este pensador se deverá igualmente a invenção, a sistematização e a divulgação da noção de *Algarismo* (os *algarismos* que hoje usamos, os quais embora popularizados pelos muçulmanos, serão de origem fenícia) e, mesmo, conceitos como o de *Álgebra* (al-jabr) a propósito de uma obra onde, de forma pioneira, se transpõe pela primeira vez uma quantidade subtraída, de um lado de uma equação, para outro, onde aquela se torna uma quantidade agregada. Curiosamente, ao referirem-se em árabe serem equações, a *reunião de partes quebradas*, este conceito, de *álgebra*, passa primeiro para a ciência europeia no domínio da medicina, concretamente da ortopedia, na reparação de fraturas ósseas...

A Geoffrey Leibniz (1646-1716) é creditado o conceito de “*computador universal*”. Em 1666, o desenvolvimento da geometria, álgebra e lógica, permite-lhe idealizar uma máquina capaz de produzir cálculos de modo automático através de símbolos universais, este conceito só mais tarde viria a encontrar viabilidade. Contudo, ao conseguir implementar uma máquina que permite efetuar cálculos básicos, este primeiro modelo funcional, capaz de operações algébricas, foi o precursor do computador e da resolução de problemas de modo automático. (Davies, 2004: 289)

A lógica matemática de Boole (1815-1864) e Frege (1848-1925) antecederam as linguagens de programação, que estão na base de funcionamento do computador e que o antecederam na sua criação⁶².

⁶² Refere a teoria dos autómatos desenvolvida por John Von Neumann (Cf. Burks, A. W. (ed.) (1996) The theory of self-reproducing automata. London: University of Illinois Press.)

Alan Turing formula o princípio formal da computação, o primeiro computador surge assim desta formalização matemática que resulta de uma evolução da matemática e dos seus diversos ramos. Os computadores atuais são em tudo semelhantes ao criado conceptualmente por Turing. Os avanços tecnológicos a nível de *hardware* e *software*, permitiram a massificação do computador pessoal. E mesmo ao nível da Inteligência artificial, a distinção desta do conceito *humanista* respetivo segue ainda a bateria de testes idealizado por Turing.

A computação gráfica fundamental para a aplicação da computadorização e da computação à arquitetura tem início e é resultado da evolução de dois ramos da matemática, a álgebra e a geometria que geraram a geometria analítica e o sistema cartesiano.

O desenvolvimento da geometria analítica, permitiu o aparecimento da geometria diferencial, teorizado inicialmente também por Leibnitz. Esta sofreu um grande desenvolvimento no final do séc. XIX, tendo sido essencial para o desenvolvimento dos processos de desenho, ainda muito marcado pela geometria plana euclidiana.

As curvas spline entretanto descobertas vieram permitir o desenho de linhas curvas continuas sem o recurso a processos de concatenação de arcos tangentes tornando-as mais suaves.

O engenheiro Pierre Bézier (1910-1999) reformula a matemática de suporte das splines e desenvolve uma curva a que dá o seu nome. Paul Casteljaou aporta para estas linhas, o conhecimento desenvolvido na descrição algorítmica de superfícies definidas por splines.

Estes desenvolvimentos culminaram no aparecimento das curvas NURBS que permitem aumentar o rigor da manipulação e construção das superfícies curvas e linhas curvilíneas.

As NURBS são o exemplo do potencial dos espaços topológicos com carácter local, ao acolherem regras entre objetos que extrapolam os princípios cartesianos de espaço.

A computação gráfica ao permitir a aplicação das lógicas algorítmicas à arquitetura, associada à teoria de grupos permite configurar o acervo gnoseológico necessário para a definição de uma geometria topológica e de carácter quantitativo.

Os diferentes modelos de conceção digital tipificados por Oxman (2005) são a expressão de conceitos matemáticos através da geometria, que facilitaram extremamente a capacidade de definir tanto objetos isolados – geometria euclidiana, como definir relações lógicas e associativas, geradoras de famílias de objetos.

Os modelos de formação, por seu lado, expressam um processo dinâmico que resulta da interação do utilizador com as ferramentas digitais, no qual a representação é substituída pela formação, resultando esta de um quadro de atributos que por sua vez configuram a forma. Este modelo é constituído por vários submodelos:

- a) Conceção topológica, fundamentada em geometrias não-euclidianas, suportadas pelos princípios de geometria topológica, que relacionam os objetos e as características destes entre si.

“A noção de topologia tem um potencial particular em arquitetura, enfatizando uma mudança de formas de expressão particulares, para as relações que existem dentro de um sítio e entre este e o programa proposto. Estas interdependências tornam-se então no princípio estruturante, organizando a geração e transformação da forma” (kolarevic 2003: 13)

- b) Conceção Associativa ou Modelação Paramétrica, pela qual se define uma estrutura geométrica, em que as várias entidades são interdependentes, tornando-se assim possível gerar variações, a partir de requisitos preestabelecidos.
- c) Os Modelos Generativos, os quais resultam da aplicação de regras geradoras da forma, em que esta não se mostra definida à partida, antes decorrendo da interação do utilizador com os denominados processos geradores, subdividindo-se estes processos em:

- c.1) Transformação gramatical, baseando-se em gramáticas de forma ou algoritmos que são expressões matemáticas, as quais definem a transformação da forma através de regras.

- c.2) Conceção evolutiva, a qual se socorre dos chamados algoritmos genéticos, criando modelos evolucionários de geração natural. Aqui, a forma é tratada como um processo generativo evolucionário, baseado em modelos biológicos.

- c.3) Modelos de desempenho, os quais fundam o seu processo de conceção no modo de funcionamento e na adequação e eficiência da solução. Este modelo suporta-se em softwares que calculam a eficiência energética, acústica, comportamento estrutural e custos.

Como se depreendeu já, a conceção digital feita através dos meios digitais permite a utilização e manipulação de geometrias de diferentes tipos (Euclidianas e topológicas). Deste modo, os princípios associativos e generativos disponibilizados possibilitam um maior grau de personalização, adaptação ao meio e resposta a programas complexos, o que lhes confere uma maior liberdade formal.

Os diferentes modelos de conceção digital suportados pela computação vieram consubstanciar um universo de meios e ferramentas que configuram novos processos de desenhar e construir.

O “*digital continuo*” associa a prática arquitetónica a um quadro instrumental definido pelas articulação das ferramentas CAD/CAE/CAM, assim conferindo unicidade ao processo de conceção e construção. Ao incrementar-se a solidez do projeto, cria-se deste modo um processo de representação autográfico, em que, quem concebe e representa também, analisa e constrói, só que em ambiente digital, cfr refere Carpo (2011: 32) alvitando que a conceção e o ciclo de conceção e construção que assim se estabelece, configura um estado ideal do modelo autográfico original.

Esta mudança de paradigma acarreta alterações conceptuais e cognitivas no exercício da arquitetura. A anterior passagem do modelo autográfico para o modelo alográfico, transformou o mestre pedreiro em arquiteto, na medida em que ele deixou de representar a ideia através do material, mas de códigos gráficos. A atual passagem do modelo alográfico para um novo modelo autográfico proporcionado pelas ferramentas e processos digitais, transforma novamente por sua vez o arquiteto para um construtor, mas agora digital.

Oxaman (2006) enuncia um conjunto de alterações decorrente dos novos meios; assim, o desenho, enquanto meio privilegiado de comunicação na conceção tradicional, evolui e passa àquilo que se designa por representação, isto é, um modo mais abrangente de comunicar a ideia, recorrendo para tal a novos meios.

Em muitos casos, na realidade não se trata de uma representação, mas da materialização digital de um objeto, quase como uma holografia, em que os materiais e as soluções são expressas e decididas naquele instante. Por analogia com a lógica albertina na qual o “desenho era o original e o edifício a cópia” (apud Alberti, Carpo 2011: 26), é possível afirmar que o edifício digital seja agora o original e o edificado a cópia.

Neste processo é abandonado o modelo alográfico, onde deixa de se representar utilizando linhas sem definição material, e em que as sucessivas escalas iam pouco a pouco desvendando as soluções materiais, na medida em que desfasavam as decisões no tempo, para se passar a um modelo autográfico, no qual se está objetivamente a definir o objeto em tempo real. Na utilização de ferramentas digitais de segunda geração já não se representam materiais, mas antes aplicar-se uma solução. Ou seja, uma parede não é mais representada linha a linha, camada construtiva a camada construtiva, é antes representada enquanto resposta a um problema, passando-se da representação de linhas para a definição material, de uma solução, com todas as implicações que daí advenham do ponto de vista do desempenho do processo construtivo, dos custos, etc.

O processo de conceção suportado pelos meios e ferramentas digitais afasta-se assim da lógica Fordiana, ainda muito presente no processo conceptual. Esta abordagem ao projeto é estratificada por sequências que se desfasam no tempo, em que o processo de composição não é informado pelos aspetos tectónicos e estruturais que viabilizam a construção, antes, estes só entram mais tarde na equação, gerando constrangimentos ao invés de exponenciarem o conceito ou, melhor, o concebido pelo arquiteto.

A utilização integrada das ferramentas digitais elimina a segregação de processos, bem como a perda de tempo e recursos, fatores que caracterizam o processo alográfico de representação, ainda dominante na prática disciplinar hodierna da Arquitetura.

O novo quadro operativo põe em causa os processos de criação e geração da forma, bem como da sua representação, tornando obsoletas as atuais metodologias de projeto baseadas num processo de desenvolvimento sequencial. Esta posição implica um novo quadro mental e cognitivo na abordagem à prática de projeto, lançando novos desafios aos arquitetos, e à sua preparação para o exercício da arquitetura.

Nesta sequência, as ferramentas digitais abordam os vários ciclos de projeto de um modo simultâneo, transversal e interdisciplinar, para gerir e integrar com a informação gerada a síntese que plasma o projeto daí resultante.

10.1.3. Tecnologias digitais v.s. Tectónica

O estudo das condições de produção (vide Cap VII) permite inferir que a evolução tecnológica altera as condições produtivas, já que cada patamar apresenta um nível tecnológico que se altera com a introdução de inovações. (Greenwald 1973:454)

Os processos produtivos foram assim sofrendo alterações em função da tecnologia disponível. Na revolução industrial e agora na era digital produziram-se saltos tecnológicos com impactos profundos na construção do artefacto arquitetónico.

A aplicação da tecnologia à produção da arquitetura e os modelos produtivos que suportavam o processo de construção ao longo da história da arquitetura mostram-se já inventariados e traduzem-se em três condições, a saber, manual, mecânica e digital (Greenwald 1973:454)

A condição manual foi durante séculos a única forma de produção, sendo caracterizada por um princípio de incerteza, a já falada “produção de risco”, decorrendo e variando com a destreza do operário. Não sendo possível à partida garantir critérios de uniformidade ou qualidade, apresenta níveis de produtividade baixa, mas revela-se flexível e apresenta uma grande capacidade de personalização.

A condição mecânica emerge da definição de um novo paradigma tecnológico, meios de comunicação e novas fontes de energia. Esta condição caracteriza-se pela uniformidade dos critérios de produção, sendo possível antever o produto final e a sua qualidade, falando-se aqui, ao invés em “condição de certeza”. A força do operário é substituída pela força mecânica e a habilidade do artesão é substituído pela precisão da máquina.

A gestão dos processos de fabricação decorrentes da especialização e da mecanização permitiram aumentar a produtividade, sendo paradigma deste incremento produtivo a linha de montagem de Ford. Contudo o aumento de produtividade teve como consequência necessária (até pela metodologia empregue) a diminuição da personalização dos produtos.

A Era Digital deu início à Condição digital, a qual é suportada em processos de computação que abrangem e agilizam a modelação, a análise e a fabricação modelar das peças arquitetónicas, pelo que este novo paradigma permite conciliar indicies de produtividade elevados com a capacidade de personalização.

A aplicação à arquitetura das tecnologias digitais CAD/CAE/CAM Kunwoo Lee (1999: 1)⁶³ permite bipartir as atividades que derivam, designadamente da conceção e da fabricação. Deste modo, o desenho está afeto à conceção e comunicação da solução arquitetónica, o qual antecede a manifestação física da peça arquitetónica. Esta etapa integra as tecnologias CAD, bem como as tecnologias CAE que antecipam o desempenho e exequibilidade do artefacto arquitetónico, permitindo a sua otimização.

As tecnologias de fabricação asseguram a materialização do artefacto arquitetónico. A fabricação é assegurada pelas tecnologias CAM, as quais vertem as informações do objeto digital para as ferramentas de fabricação digital. A sua aplicação à arquitetura possibilita a materialização da informação digital gerada pelas ferramentas CAD/CAE.

As tecnologias CAM são para Lee (1999: 6) os “*sistemas computacionais para planejar, gerir e controlar as operações de fabricação através de um interface direto ou indireto com os recursos de produção da fabrica*”.

A integração deste aparato tecnológico confere novas dimensões e possibilidades à tectónica da arquitetura. A articulação das tecnologias CAD/CAM possibilita que estas máquinas possam ser controladas por computador, com vista à fabricação de peças personalizadas, permitindo assim a construção de formas mais complexas sem que tal se reflita nos tempos de construção e, corresponsivamente, nos custos.

Estes equipamentos apresentam uma grande versatilidade, constituindo as principais tecnologias de manufatura, os processos de fabricação, denominadas de, aditiva, subtrativa, formativa e fabricação robótica.

A integração das tecnologias digitais no processo de conceção e no ciclo de fabricação, permitiu aos sectores automóvel, naval e aeronáutico, encurtar os tempos de produção e construção, aumentando consequentemente a produtividade.

⁶³ Lee, K. (1999): *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison Wesley Longman;

Este quadro tecnológico facilita a interação dos diferentes especialistas, promovendo um maior fluxo de informação e articulação entre as especialidades e áreas de conhecimento que contribuem para a solução final.

A sectorização do projeto nestas indústrias não se traduziu, numa desarticulação ou incompatibilidade das soluções, mas antes, através da simbiose e da simultaneidade, na geração de novos materiais e novas soluções, melhorando globalmente o processo produtivo e gerando produtos mais personalizáveis com menores custos de produção.

Por analogia é possível afirmar que a indústria da arquitetura e construção beneficiaria em adotar práticas similares. A standardização a pré-fabricação e a robótica são alguns métodos construtivos – (tectónica), cuja integração no ciclo construtivo da arquitetura permitiria melhorar os seus processos produtivos de baixa produtividade ainda hoje muito ligados a uma lógica artesanal, de construção *in situ*, com recurso a uma significativa componente de mão-de-obra intensiva.

Mitchell (2001:354)⁶⁴ refere que o arquiteto tende a desenhar aquilo que sabe construir, assim, este substrato tecnológico deve ser responsável pelo desenvolvimento dos novos “vocabulários” a nível do projeto.

Estes novos processos construtivos permitiriam dar expressão e controlo formal à manipulação geométrica efetuada em ambiente digital. exponenciando a articulação da conceção com a construção.

A continuidade tecnológica CAD/CAE/CAM, permite a manipulação geométrica e construção de geometrias, cuja formalização conceptual e física se apresente mais complexa, como é o caso das superfícies curvas e de dupla curvatura. O avanço no capítulo do software permite uma abordagem mais interativa e amigável, na transposição do desenho visualizado no ecrã, para a maquete, protótipos físicos e componentes do processo de concretização da ideação do Arquitecto.

⁶⁴ Mitchell, W.J. (2001): “Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds”, in J. Fiona Ragheb (ed.), *Frank Gehry, Architect*, pp. 352-363, New York: Guggenheim Museum Publications

10.1.4. Fenomenologia estrutural v.s. Tectónica

Os cálculos matemáticos não têm expressão no desenvolvimento do conceito estrutural do projeto. Este resulta antes, do conhecimento do funcionamento da forma que emerge do processo de composição e que plasma a solução encontrada para o problema arquitetónico. Como lapidarmente nos dizem Moraes e Rebello, a geração do sistema estrutural é gerado pela criatividade humana e não pelo cálculo.

O cálculo não cria a forma, apenas a valida, e também não é necessário para a compreensão do funcionamento estrutural, ou para conduzir o espírito criador do arquiteto à solução. Somente depois da determinação dos elementos essenciais do conceito e uma vez este formalizado, é que a análise matemática realiza sua real função, validando e otimizando o sistema, dimensionando seus componentes e garantindo segurança e economia. (Hengel, 1984: 21)

A compreensão e utilização dos conhecimentos inerentes à fenomenologia estrutural não tem apenas consequências no funcionamento estrutural, na medida em que apresenta ainda uma dimensão ética e estética da forma, que se traduz na esbelteza das peças arquitetónicas e, conseqüentemente, nos impactes que podem ser aferidos e constatados, não podendo deixar esquecidos, ao lado dos já referidos, os de carácter económicos, sempre determinantes num determinado momento para a viabilização do artefacto arquitetónico.

Por sua vez, a viabilidade estrutural do objeto não se esgota nas premissas a cumprir. Com efeito, para que este ascenda à condição de arquitetura, é necessário implementar a sua construção através de um processo capaz de viabilizar física e geometricamente a forma estrutural. A passagem do plano conceptual para o plano material dá-se assim pela utilização de uma tectónica. Esta passagem implanta o conceito de *firmitas* elencado por Vitruvius.

A necessidade de repor o parque habitacional no pós-guerra 39/45 motivou uma busca pela diminuição dos custos e do tempo de execução, de tal sorte que os processos tectónicos que resultaram deste contexto caracterizam-se pela linearidade e pela diminuição da personalização. (Kieran and Timberlake, 2004)

As superfícies curvas não obstante as suas potencialidades foram preteridas pelas formas lineares, por mais fáceis de construir, deste modo registando-se

consequentemente uma maior evolução nos processos construtivos das formas lineares por comparação com os das formas curvas, cuja construção se manteve mais ligada a processos artesanais.

Uma tectónica feita por processos mais tradicionais, com recurso a uma mão de obra intensiva e mais qualificada relegou estas formas para um plano de utilização residual. A sua utilização acabou por se confinar a situações em que o material não respondia às tensões geradas pelo vão a vencer, sendo necessário recorrer à manipulação da geometria da forma para responder a estes desafios. Deste modo estas formas acabaram por se restringir a obras de exceção.

A falta de sistemas construtivos capazes de materializar as formas estruturais curvas, de modo rápido e a baixos custos determinou a sua pouca utilização no âmbito da arquitetura de vanguarda, mas que não queira ser de situações de exceção. Neste contexto emergiu a necessidade de formalizar algo capaz de responder a estes desafios.

A compreensão do funcionamento estrutural e as respetivas necessidades de construção conformaram um sistema construtivo proposto, o qual parte da compreensão de princípios estruturais, para gerar um processo de construção que diminua efetivamente o tempo e os custos da respetiva construção. Sem este conhecimento, o processo de construção em sistema Brick-warp não seria possível.

O estudo da fenomenologia estrutural (vide Cap. IV), em particular o conhecimento do fenómeno designado por momento externo aplicado, gerado pela gravidade, permitiu encetar uma investigação cuja solução anula esta rotação. Ao gerar os níveis de compressão registados nas formas curvas quando se encontra finalizada, durante o processo de construção, torna-se assim possível dispensar a utilização de cavaletas, andaimes ou cimbramentos.

O estudo das diferentes condições tecnológicas que os processos construtivos vinculam (vide Cap. VII) permitiu gerar um ciclo produtivo único que responde cabalmente às necessidades de fabricação das formas curvas.

A conjugação destas diferentes condições de produção, permite associar os processos de personalização em série ou *mass customization*, com os processos de fabricação em série e assim gerar um sistema que incorpora a personalização sem perda de

produtividade, permitindo otimizar o ciclo construtivo das superfícies curvas e de dupla curvatura, potenciando a utilização destas formas na arquitetura.

O sistema construtivo é assim um processo de síntese e de síntese transversal a diversas áreas da arquitetura e de ramos do conhecimento, que por sua vez articula o funcionamento estrutural com os processos construtivos.

10.1.5. Teoria da arquitetura vs Fenomenologia estrutural

A teoria de projeto adotada⁶⁵ advoga que o espaço arquitetónico emerge da articulação do programa como lugar. A dialética assim estabelecida gera um processo de composição, no qual se definem os espaços, as suas hierarquias, relações funcionais, áreas e dimensões, permitindo caracterizar deste modo um volume imaterial.

A composição define o espaço e a geometria que lhe está associada e a manifestação material do projeto, isto é, a associação de um material à geometria faz com que esta ascenda à condição de forma, logo, que seja afetada pela gravidade e pelo seu peso próprio, despoletando por isso a necessidade de um sistema portante da força e, consequentemente, da procura de um equilíbrio formal.

Este passo metodológico é decisivo no processo conceptual e, apesar de muitas vezes ignorado ou negligenciado ele é decisivo para a compreensão fenomenológica das formas estruturais.

O sistema estrutural está latente e é intrínseco à composição. Conceber o espaço é conceber a forma, que deve ser entendida como a *manifestação material da geometria*. A forma define consequentemente o sistema estrutural que viabiliza a trilogia: espaço – forma – material. Conclui-se, assim, que a conceção do sistema estrutural é algo tão precoce como, talvez mesmo mais do que, a definição do espaço, e que decorre de um processo iterativo, e *iterativo*, entre o espaço e a forma.

Conceber a forma estrutural é gerir e manipular a geometria da forma, é saber desenhar com a direção das forças. A matéria é um palimpsesto que se redesenha em função da

⁶⁵ Mahfuz, E. 1995. Ensaio da Razão Compositiva. Belo Horizonte, Ap Cultural

direção da força e, logo, saber distribuir a matéria no (pelo) espaço é (um)a arte que o arquiteto deve dominar.

Esta noção é resumida no reconhecimento de que em biologia, “o material é caro, mas a forma é barata”, enquanto que até hoje o contrário era verdadeiro no caso da tecnologia⁶⁶.

A forma e a estrutura organizam-se no espaço de modo tridimensional e é a configuração da forma que determina a estabilidade da estrutura e, consequentemente, da matéria e o respetivo desempenho, também estrutural, durante o seu ciclo de vida útil.

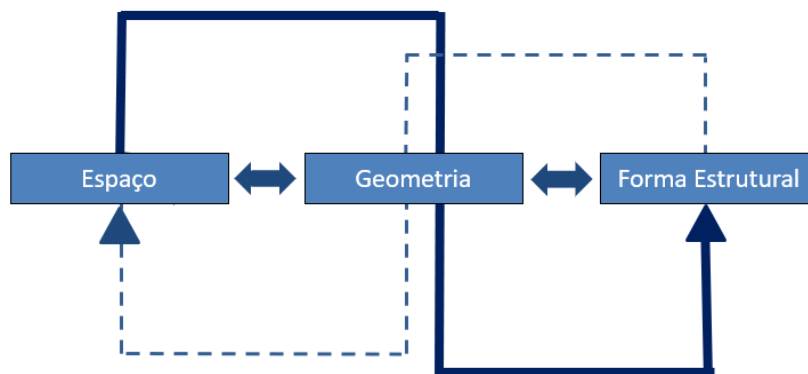


Figura 10.2 – Espaço – Geometria - Forma estrutural
(do autor)

A metodologia de projeto é ainda muito marcada por preocupações funcionais e compositivas, dispensado pouco tempo ou mesmo ignorando o potencial da fenomenologia estrutural no processo de conceção do espaço.

Esta é a falha da *Morfogénese digital* que tem como paradigma operativo a geometria. A configuração do objeto arquitetónico é feita segundo parâmetros geométricos, manipulados em ambiente digital, no qual não existe gravidade nem material, aspetos determinantes para a Arquitetura. Ignorar a ação da gravidade sobre a matéria no momento conceptual é como já vimos anteriormente, fragilizar o processo metodológico, com consequências nefastas no artefacto arquitetónico e que se acabam por pagar caro, mais cedo ou mais tarde, aquando da avaliação do respetivo equacionamento.

⁶⁶ Vincent, Julian 2009 'Biomimetic Patterns in Architectural Design', D Patterns of Architecture, vol 79, No 6. pp 74-81.

Os meios digitais disponibilizados aos projetistas, criam uma nova era com possibilidades de expressão formal sem precedentes históricos, no que respeita à irregularidade e organicidade, criando igualmente novos desafios metodológicos e cognitivos no ato de projetar.

Oxman (2006) faz ressaltar contudo que o carácter revolucionário do projeto digital não resulta da forma, mas da diversidade, da diferenciação e da evolução dinâmica.

A viabilização da forma através de lógicas e sistemas estruturais que se repetem resulta numa uniformização nefasta, subtraindo riqueza e criatividade do espaço arquitetónico. As superfícies curvas, ao mesmo tempo que aportam eficiência estrutural e podendo minimizar, ainda, os impactos económicos, permitem revelar além disso, uma ousadia formal, que permite inovar e acrescentar riqueza do ponto de vista espacial à arquitetura, conferindo ao espaço criado uma forte, porque diferente expressão plástica.

A arquitetura enquanto ato conceptual informado pela “*arte estrutural*”⁶⁷, no qual a forma enquanto estrutura assume o seu valor plástico, despojada de qualquer artifício ou ornamento, é mais que uma resposta estritamente estática, ou simplesmente estética, é uma afirmação ética, na qual se afirmam os valores da racionalidade da eficiência, da perenidade, do equilíbrio dinâmico, mas também a definição de uma estética com uma forte expressão plástica.

10.2 Verificação das hipóteses gerais

A investigação foi desenvolvida, recorrendo às hipóteses que são agora revistas de modo a apurar conclusões. Assim, temos, para a:

Revisitando agora a hipótese 1, relembra-se que aí:

A proposta de conceção de uma metodologia operativa que possibilite a conceção e construção de superfícies curvas através da utilização das ferramentas digitais, permitindo consubstanciar uma abordagem prática ao projeto, que integre a conceção, análise e construção destas formas, conferindo-lhe solidez teórica e eficácia.

⁶⁷ Billington D. 1985, *The Tower and the Bridge; The New Art of Structural Engineering*, Princeton NJ, Princeton University Press

Neste domínio, a problematização abordada no capítulo I, possibilita perceber a necessidade de criação um procedimento complexo e abrangente, cuja operacionalização permita lidar acessível, efetiva e consistentemente com as especificidades geométricas das formas curvas.

Com efeito e dado o seu maior grau de complexidade, estas exigem uma metodologia que *articule* a conceção com a construção, apresentando-se as ferramentas e meios digitais como (um)a plataforma capaz de consubstanciar este processo. Contudo, verifica-se concomitantemente que, a utilização das referidas ferramentas, até pelo meio em que se insere (digital) não costuma levar em conta a espessura e resistência dos materiais e, conseqüentemente, não costuma abordar o efeito da gravidade sobre estes, designadamente ao nível da fenomenologia estrutural, no sentido de melhor otimizarem a forma em função da força gerada.

Ou seja, dito de forma mais técnica, a análise da Morfogénese Digital tende a esquecer a necessidade de evoluir para Morfogénese Estrutural. Igualmente, considera-se não se verificar preocupação em considerar os meios tecnológicos como elementos essenciais à consecução da referida otimização.

Finalmente, não existe uma metodologia e, ainda menos uma plataforma, que procure articular todos estes meios de modo a otimizar a respetiva articulação no âmbito da sua utilização em projeto.

Para a concretização da hipótese 1 é proposta a aplicação do *Ensaio da Razão Compositiva* escrito por Edson Mahfuz, ao quadro operacional gerado pelas ferramentas digitais CAD/CAE/CAM, que permite operacionalizar o conceito definido por Kolarevic como “*continuo digital*”, gerando assim uma metodologia, que confere um suporte teórico e articulado aos meios digitais

Do estudo feito ao *Ensaio da Razão Compositiva*, (vide Cap. VIII) é possível inferir que esta não se limita a uma abordagem funcional e compositiva da prática do projeto, antes expressa uma lógica conceptual na qual a dimensão tecnológica emerge, como a razão que valida as opções de projeto. E é a manifestação material do projeto que permite conceptual e substancialmente elevar o projeto à condição de arquitetura.

O projeto de arquitetura para Mahfuz (2006) emerge de um Problema proposto ou a propor, a que o “todo conceptual” responde; a solução é assim gerada por uma “ideia preliminar”, a qual, até por isso, se consubstancia como (devient) estruturante do projeto

e informa o desenvolvimento de todas as partes que constituem o “todo compositivo”, deste modo cristalizando a respetiva organização e cuja cristalização resulta numa solução formal expressa através de um registo gráfico.

Para esta fase de projeto, as ferramentas digitais que suportam a conceção (necessariamente) digital do artefacto arquitetónico, disponibilizam um conjunto de soluções para transmitir e cristalizar a ideia encontrada. Assim esta pode manifestar-se quer a partir de um desenho digital produzido através das ferramentas CAD, quer a partir de um modelo físico ou digital. As referidas ferramentas digitais permitem facilitar não só a manipulação da representação/desenho/ do objeto digital, como também promover uma maior interligação entre as diferentes dimensões conceptuais e.g., estrutural, tectónica e simbólica.

A composição na arquitetura é muitas vezes objeto de estudo no âmbito da teoria da arquitetura, sendo explicada por alguns autores (cfr. Victor Consiglieri⁶⁸, António Braizinha,⁶⁹ entre outros) como o resultado de processos lógicos (indução, dedução ou abdução e, aqui, acrescentaríamos a intuição) a partir dos quais é manipulado e articulado um conjunto de elementos conceptuais (como modelo, tipo, arquétipo, tipologia, etc.). Esta abordagem ao projeto tem como foco essencialmente a composição, não sendo muitas vezes por isso capaz de contemplar as dimensões tectónicas e estruturais no ato compositivo.

A composição tem uma dimensão tecnológica implícita, de que o arquiteto nem sempre tem consciência, pois a mesma decorre muitas vezes de uma prática metodológica que não incorpora o potencial da tecnologia no processo de conceção, sobrevalorizando o ato compositivo em detrimento da dimensão tecnológica. Esta abordagem frequentemente apresenta custos posteriores na implementação do projeto, constituindo-se por isso como uma clara limitação metodológica ao arquiteto na abordagem ao projeto.

A abordagem teórica proposta por Mahfuz (2006) contempla a dimensão tecnológica no processo ideativo, a qual decorre da passagem do “*todo conceptual*” para o “*todo*

⁶⁸ Consiglieri, Victor, 2000, *As Significações da Arquitectura – 1920-1990*, Ed. Estampa, Lisboa, p.147

⁶⁹ Braizinha, Joaquim, 1989, *Projecto clássico em Arquitectura*, dissertação para doutoramento, UTL, Faculdade Técnica de Lisboa

construído”. Com efeito, aqui, a ideia e a sua representação não se esgotam em si mesmas, são antes um pretexto, melhor dizendo um dos ou o pressuposto para o emergir da tecnologia no ciclo conceptual.

Esta transição resulta na caracterização material e consequentemente tecnológica das partes que constituem a “*consequência formal*” (i.e., a expressão formal do “*todo conceptual*”) e desta busca emerge uma solução tecnológica, que não só expressa o “*todo construído*” com também o (in)forma.

O “*todo conceptual*” e o “*todo construído*” apresentam um vínculo bijetivo, na qual a solução material resulta do conceito; assim, o “*tudo conceptual*” não só é informado pela tecnologia como também a acolhe. Percebe-se, pois, que esta passagem resulta (d)e um processo dialético no qual se procura expressar uma ideia através do material, da geometria e da tecnologia.

Este momento da teoria de Mahfuz encontra suporte operativo nas ferramentas digitais CAE e CAM, as quais permitem validar e viabilizar as soluções encontradas no do projeto. As ferramentas CAE permitem assim assegurar a análise estrutural, energética, acústica, lumínica e financeira, o que por sua vez permite antever e se necessário corrigir o desempenho da peça arquitetónica. Já as ferramentas CAM implementam construtivamente a peça arquitetónica, constituindo-se assim uma solução construtiva, pelo que deste modo é possível pensar o projeto de arquitetura de um modo integrado.

O “*continuo digital*” assume, consequentemente fortes implicações na conceção e construção da arquitetura, já que o processo de representação da arquitetura deixa de feito pelo desenho, para passar a ser feito por um modelo construído em ambiente digital, leia-se um modelo de informação, que pode ser partilhada e trabalhada em simultâneo, em várias vertentes.

O exercício de projeto passa a ter um desenvolvimento simultâneo e interativo, em que qualquer solução formalizada pode de imediato ser testada a nível do seu desempenho e das possibilidades de execução, o que permite ter uma visão integral do projeto, conferindo-lhe não só solidez projetual como permitindo exponenciar o processo criativo.

A conceção digital estabelece um novo paradigma mental, pelo qual tem de ser capaz de integrar as diferentes fases da arquitetura, designadamente a articulação da conceção e da construção, sendo esta uma condição essencial não só para a gestão

geométrica das formas curvas e de dupla curvatura, como igualmente para a sua implantação tectónica.

Uma utilização sólida dos meios digitais requiere o desenho de um processo operativo, por um lado mais específico e detalhado que a aplicação das ferramentas digitais às tarefas de projeto enunciados nos esquemas taxonómicos produzidos por José Duarte et. Al, e Mitchell & McCullough (vide Cap.VI), mas, por outro, também, menos abstrata que do Modelo de Rivka Oxman que procura catalogar a um nível fenomenológico as alterações produzidas pelas ferramentas digitais, no processo conceptual.

O sucesso da integração das tecnologias digitais na arquitetura e o seu contributo para a solução do problema arquitetónico, não decorre única e exclusivamente das ferramentas e processos utilizados, mas do modo como estes são integrados e por sua vez interagem durante o processo de projeto.

Torna-se assim necessário encontrar um paradigma mais detalhado e objetivo, capaz de enquadrar as ferramentas digitais a um nível operativo, conferindo ao arquiteto uma base operacional consolidada pela teoria de projeto, tendo por isso sido proposto um modelo taxonómico, que articule as diferentes ferramentas e processos digitais na criação e produção de superfícies curvas e de dupla curvatura.

Pelo seu carácter esquemático e abstrato, houve a necessidade de assegurar o respetivo aprofundamento, em termos objetivos e operacionais, de forma a balizar fronteiras e objetivos de atuação durante o processo conceptual das superfícies curvas e de dupla curvatura, configurando assim um verdadeiro e inovador paradigma operativo (vide Cap. VIII).

A grelha operativa formulada é então definida por um conjunto de axiomas operativos, que mapeiam o ciclo ideativo do arquiteto na prática de projeto, no qual a criatividade é a força motriz. Estes procuram expressar e sintetizar, a sua complexa teia de vínculos e correlações que resultam e estão presentes na conceção, vinculando e interligando, o lugar, o programa, o papel da tecnologia, a significação e memória na arquitetura.

O quadro operativo descrito (vide Cap.VIII) permite expressar e efetivar as correlações enunciadas. O pressuposto de atuação proposto confere ao quadro uma transversalidade que torna o projeto, um processo global. E será este entre todos o seu traço mais distintivo.

A aplicação do paradigma operacional ao caso prático permitiu, aferir a viabilidade da articulação do *Ensaio da Razão Compositiva* com o quadro instrumental definido pelo CAD/CAE/CAM. Esta metodologia revelou-se capaz de integrar os novos modelos de representação, como de dar resposta aos desafios colocados pela construção das superfícies curvas.

Revisitando agora a hipótese 2, relembra-se que aí:

Se questionava a possibilidade de a articulação dos meios de produção em série, com os meios de fabricação digital, gerar um processo de produção que se consubstanciasse num sistema construtivo/estrutural, capaz de otimizar e facilitar a construção das formas estruturais curvas.

Então, o problema agora (re)colocado era a necessidade de contribuir através de estudo e pesquisa, para a opção por uma solução que pudesse assegurar a criação de um sistema construtivo que respondesse com eficiência à materialização da problemática perceptível na primeira hipótese, concretamente a materialização de formas curvas.

Por outro lado, colocava-se igualmente a necessidade de baixar custos e os tempos de realização das soluções construtivas pelas quais se optasse.

Com efeito, conciliar os baixos custos da produção em série, com a capacidade de personalização própria das ferramentas digitais, aliando a maior facilidade de conceção geométrica, ao seu fulgor plástico, às suas potencialidades espaciais e à economia de material, permitiria definir um acervo conceptual complexo, mas integrado que criasse um veículo capaz de potenciar a difusão das formas curvas na Arquitetura.

Entrando na análise do problema, ao longo da história podemos verificar três momentos em que se verificaram saltos tecnológicos que definiram as condições manual, mecânica e digital, os quais introduziram profundas alterações nos meios e nas condições de produção, na medida em que apresentaram características específicas que lhes eram intrínsecas e as definem, dotando-as de potencialidades próprias (vide Cap. VII).

O cruzamento da eficiência da produção em série, a flexibilidade da personalização em série, disponibilizado pelas ferramentas e meios digitais, permite tirar partido em simultâneo de um processo de grande eficácia produtiva, como é a fabricação em série,

diminuindo assim os custos produtivos a que se associam as potencialidades das ferramentas de fabricação digital para personalização das peças.

A articulação destes dois processos permite conceber um processo de **produção em série personalizável**, no qual se potencializa em simultâneo a produtividade e a personalização. Trata-se de um processo híbrido, que por isso mesmo se distingue do conceito de personalização em série (mass-customization) e que apresenta potencialmente níveis de produtividade ainda maiores.

O ciclo de produção foi gizado de modo a beneficiar da democratização das ferramentas digitais, tornando assim possível desenvolver um processo otimizador e racionalizado com meios acessíveis, recusando soluções só ao alcance de parques tecnológicos muito avançado, apenas existentes em centros de investigação, o que limita a disseminação dos processos.

Os atuais processos aditivos de fabricação digital apresentam limitações no processamento de peças cerâmicas, não sendo possível produzir os módulos concebidos através destes processos.

Os processos subtrativos revelam-se pouco racionais produzindo muitos resíduos e consumindo muito tempo na sua execução. A utilização dos processos subtrativos para a execução integral das peças resultava, pois, num processo moroso e dispendioso.

A solução proposta passou pela customização de módulos pré-fabricados, em que a utilização dos métodos subtrativos é restrita ao mínimo, diminuindo os custos e tempos de produção. O ciclo gizado leva ainda em conta o material e as suas características, pelo que, a personalização é feita antes da cozedura das peças cerâmicas, pelo que deste modo todos os resíduos decorrentes da fresagem são reaproveitáveis, o que normalmente não acontece e se constitui num óbice dos processos subtrativos de fabricação digital.

A hipótese de investigação não só tirou partido da relação entre as diferentes condições de produção, conseguindo-se que a solução encontrada emergisse e beneficiasse também, da relação existente entre o desenho e a construção. Este vínculo é reconhecido historicamente, tendo aliás levado William Michell (2001: 354) a afirmar que *os “arquitetos tendem a desenhar aquilo que podem construir, e a construir aquilo que podem desenhar”*.

Esta correlação expõe a dependência entre o desenho e a construção, sendo as condições de produção determinantes para a otimização do ciclo construtivo da arquitetura. A solução encontrada beneficia da relação entre os processos de representação e de fabricação definidos pela aplicação das ferramentas digitais. Deste modo, o desenho digital, entendido como representação do artefacto arquitetónico, encontra na fabricação digital uma extensão natural.

A solução apurada suporta-se na evolução dos métodos computacionais e da aplicação das ferramentas digitais à Arquitetura, que o estudo realizado, pensa-se, permitiu conhecer melhor e deste modo potenciar a aplicação das suas capacidades, quer na manipulação formal, quer na sua produção.

Só uma visão holista da prática da arquitetura permitiu conceber um fluxo de trabalho (*workflow*) que pretendeu dar uma resposta operativa mais adequada à produção de superfícies curvas, ajustando diferentes meios disponíveis a esta tarefa.

Para este trabalho foi montada uma estratégia específica que teve sempre em vista articular processos high-tech com processos low-tech, com o objetivo de, simultaneamente, alcançar elevados níveis de otimização e disseminação do processo.

A disponibilidade e democratização dos meios de produção empregues nesta investigação, potencializa a sua disseminação e aplicação aos diferentes contextos reais.

10.3 Objetivos específicos ou parciais

Os objetivos específicos apontados decorrem da operacionalização dos objetivos gerais, sendo a sua consequência direta. Uma vez que a investigação produzida conseguiu alcançar as metas a que se tinha proposto, cumprindo os objetivos principais, é possível inferir que os objetivos específicos ou parciais também foram alcançados, pois estes contribuíram para alcançar as metas globais definidas.

10.4 Hipóteses específicas

As referidas hipóteses surgem da necessidade de assegurar o conhecimento necessário que garantisse a efetivação prática das soluções ideadas para a problematização efetuada, através de investigação idónea.

Uma vez que gravidade produz o seu efeito durante a construção destas superfícies, a estabilidade necessária para sua materialização suscitou a indagação científica da vantagem na utilização do pré-esforço na implementação de uma possível solução. Daí referir-se que:

Revisitando agora a hipótese específica 1, relembra-se que aí:

Na qual se procurou então constatar se a geração de pré-esforço permitia criar e operacionalizar um sistema capaz de contrariar a gravidade, estabilizando o processo de construção das superfícies curvas.

A investigação desenvolvida possibilitou criar um sistema construtivo, que através da utilização de pré-esforço permitiu estabilizar a superfície durante a sua construção, tendo sido assim possível dispensar a utilização de cimbres ou qualquer outro sistema ou infraestrutura de suporte na construção do protótipo. Este facto reveste-se de particular importância facilmente se consegue depreender que, como consequência é possível diminuir os tempos e os custos de construção de superfícies curvas, tornando este sistema construtivo particularmente competitivo.

O vão resulta do modo como o Homem se apropria do espaço, sendo marcado pela horizontalidade, já a gravidade é caracterizada pela sua direção vertical descendente, sendo responsável pelo peso próprio da matéria, que gera rotações nas superfícies horizontais. A utilização do pré-esforço compatibiliza este conflito intrínseco entre a gravidade e a criação de vão.

O pré-esforço é gerando por cabos que são incorporados no interior dos módulos cerâmicos, em que a ligação entre estes dois elementos é feita por peças de clipagem, anulando-se desta forma o momento externo aplicado decorrente do peso próprio do material. A compressão produzida por estas ferragens, reproduz ainda na fase de construção, os níveis de compressão existentes depois da montagem da forma, esforços estes responsáveis pelo funcionamento e estabilização estrutural da forma.

Para esta solução contribuíram o estudo e a compreensão fenomenológica das tipologias estruturais, bem como, o desenvolvimento dos conhecimentos necessários para a manipulação das formas estruturais, o que permitiu adequar as soluções tecnológicas e estruturais aos requisitos espaciais, objetivo importante para compreender o comportamento dos materiais face às condições de carregamento.

Nenhum método de desenho quer tenha como suporte o papel, ou o ambiente digital expressa as consequências da gravidade, ou o comportamento dos materiais, A trilogia força, forma, eficiência, informa o funcionamento das formas estruturais, sendo este decorrente do modo como a matéria é disposta.

O conhecimento do funcionamento estrutural, e o modo como as “forças caminham” permite ao projetista aprender a desenhar com a direção das forças e assim obter formas mais expressivas e mais eficazes.

As formas estruturais apresentam uma estética que decorre de uma ética material, a qual resulta da sua manipulação e das suas potencialidades intrínsecas, sendo que a respetiva adequação permite a geração da forma a partir do funcionamento estrutural, assim se consubstanciando a denominada Morfogénese estrutural.

Revisitando agora a hipótese 2, relembra-se que aí:

No âmbito desta hipótese, colocou-se a avaliação da possibilidade de a *construção de formas curvas poder ser efetuada a partir de um módulo cerâmico produzido em série e personalizado através máquinas de corte CNC.*

A questão foi equacionada, atendendo a que as formas curvas pelas suas características geométricas apresentam uma dificuldade extra na sua construção, tornando-a mais difícil e morosa, pelo que a solução para esta realidade poderia passar pela conjugação da standardização e personalização, criando um conceito híbrido da personalização em série personalizável.

O processo construtivo desenvolvido é composto por módulos cerâmicos pré-fabricados, cuja filosófica subjacente resulta de um processo de fabricação em série personalizável.

A produção das peças cerâmicas é feita através do recurso a moldes de prensagem, sendo o interior das peças posteriormente vazado por cortantes suportados por guias de corte. O desenho da peça teve em conta as necessidades de acolher um cabo no

seu interior e de permitir uma fácil personalização através de fresagem. Por esta razão, o módulo apresenta duas folhas, cuja separação permite ainda efetuar o corte térmico e potenciar o desempenho acústico, fruto do efeito massa, mola, massa.

A escolha da cerâmica como suporte material do sistema construtivo teve em conta não só o facto de ser um *cluster* da nossa indústria, mas também as potencialidades físicas do material.

A produção dos módulos a partir de pasta cerâmica é fácil, não só pelas características do material, mas também pelo potencial de disseminação desta tecnologia face à abundância deste material, tendo-se esta apresentado deste modo como a solução mais viável para a implementação do sistema.

Para levar a cabo a produção dos módulos cerâmicos foi necessário adquirir um conjunto de conhecimentos que se efetivaram através da prática. A procura de um ciclo de produção e um processo que permitisse alcançar os requisitos necessários para a fabricação dos módulos, permitiu aprender e apreender um conjunto de conhecimentos através do manuseamento e execução dos passos necessários para a manufatura dos taceiros de prensagem.

O processo de customização é feito com base na divisão da superfície, através de um processo de tecelagem/paginação das peças cerâmicas que determina a sua estereotomia, sendo posteriormente implementado o corte por ferramentas CNC, este talhe confere às peças a estereotomia adequada para a geração da superfície curva. Só após este processo a peça é sujeita a cozedura de chacota.

Todo este processo foi enriquecedor e sempre de acordo como o espírito e objetivos iniciais da tese, em que as soluções encontradas decorreram da tecnologia disponível e do grau da sua eficácia. Ao não reduzir as soluções a um determinado espectro tecnológico, o processo em causa configurou um método que se revelou flexível e muito eficaz.

Revisitando agora a hipótese 3, relembra-se que aí:

Nesta hipótese específica, colocou-se em consideração se os materiais tradicionais, seriam adequados ao funcionamento estrutural das formas curvas, sendo deste modo possível potencializar os clusters nacionais, como se referiu.

A formulação da hipótese 3 partiu assim da consciência de que a otimização da forma em função do funcionamento poderia ser realizada através da produção de tensões de compressão, sendo assim possível a adoção de matérias menos transformados e mais baratos, eventualmente potenciando algum dos referidos clusters.

A adoção do funcionamento estrutural como ferramenta ideativa, resulta num processo conceptual, em que a forma não resulta da performance do material ou da sua tensão de rutura, mas da manipulação formal do artefacto arquitetónico.

O equilíbrio básico de forças gerados através da forma, permite alcançar formas geradas à compressão pura, nas quais as tensões são mínimas face ao potencial que os materiais apresentam. Este facto facilita a conceção, pois é possível escalar estas formas, sendo por isso estruturalmente aceitável testar um modelo ou um protótipo e assim antecipar o que acontece na escala real.

A estática gráfica (vide Cap. V) funda-se no trabalho produzido por Karl Culmann, e decorre de uma construção vetorial na qual se procura encontrar o equilíbrio destes processos gráficos, os quais permitem compreender o funcionamento estrutural do artefacto arquitetónico de um modo intuitivo e igualmente validar e otimizar o objeto.

A manipulação destas formas pode ser efetuada por modelos físicos, como as construções funiculares celebrizadas pelo arquiteto Antoni Gaundí, atendendo ao respetivo grau de sofisticação e expressividade. A construção e medição destes modelos nem sempre é fácil e revela-se morosa (vide Cap. V).

As ferramentas digitais de desenho e análise vieram facilitar a utilização dos modelos funiculares como ferramenta de projeto, ao diminuírem o tempo de construção e o processo de avaliação.

Estes processos de manipulação formal permitem otimizar a forma, de modo a que esta produza apenas compressões no seu funcionamento estrutural, sendo assim possível o recurso aos materiais tradicionais como a cerâmica para a construção deste tipo de superfícies curvas.

Os materiais tradicionais, necessitam de menos transformação e processamento, logo apresentam menores custos de produção e menor nível de impacto.

A evolução tecnológica das peças cerâmicas acresce valor ao *cluster*, tornando esta tecnologia mais difundível.

Revisitando agora a hipótese 4, relembra-se que aí:

Esta hipótese específica, postulou-se aqui a validade da verificação de o processo de trabalho adotado para a investigação realizada permitir criar um paradigma operativo que suportasse o processo de morfogénese estrutural.

Com efeito, a manipulação da forma revela-se determinante para o seu funcionamento estrutural, marcando em função do respetivo desempenho estrutural, a sua viabilidade física, sendo ambos determinantes para garantir a sua implantação material. E, para além disso, a geração da forma com pressupostos estruturais permite exponenciar a expressividade e diminuir custos e impactos.

O *modus operandi* estabelecido com este trabalho resulta assim um quadro ideológico e metodológico que se baseia no conceito da gravítica da forma e na compreensão fenomenológica da forma. Aquele quadro subalterniza as potencialidades mecânicas do material exacerbando as virtudes da forma e do equilíbrio gerado pela manipulação da matéria.

Estes axiomas permitem a ideação da forma que aporta em simultâneo valor plástico e otimização ao artefacto arquitetónico consubstanciado tal como já referido uma estética que se suporta numa ética material. Com efeito, Dieste di-lo de forma sintética:

"As virtudes resistentes que procuramos na estrutura, dependem da forma, é através da forma que a estrutura adquire estabilidade, e não pelo acumular de material. Não há nada mais nobre e elegante do ponto de vista intelectual do que isso, resistir através da forma."(Dieste, 1996).

Estes princípios mostram-se propositadamente vertidos na metodologia proposta, estando esta assim integrada num processo mais vasto que abarca a sua fabricação e construção, i.e., do artefacto e da forma.

A forma gerada resulta do funcionamento estrutural e esta é desenhada pela direção das forças, estabelecendo-se deste modo uma dialética entre a forma enquanto contendor do espaço, e a estrutura enquanto sistema que viabiliza a forma.

O processo adotado parte do princípio de que a forma é o culminar da uma interação produzida pela articulação do funcionamento estrutural, da expressão espacial e dos processos construtivos.

O processo desenhado apresenta uma visão integrada de conceção, produção e construção, sendo este processo fruto de um processo criativo abrangente, que integra a composição e a tecnologia, utiliza o “continuo digital” e as potencialidades das ferramentas digitais.

Revisitando agora a hipótese 5, relembra-se que aí:

Esta hipótese específica, procurou averiguar-se se a realização de um protótipo possibilitava aferir a eficiência da metodologia desenhada para a conceção e construção das formas curvas e de dupla curvatura, bem como a eficácia do sistema construtivo criado.

A execução do protótipo funcionou deste modo como um laboratório que permitisse validar e desenvolver as soluções propostas, se se quisesse uma verdadeira prova de conceito, sendo uma peça fundamental em todo o processo de investigação desenvolvido.

Foi definido um algoritmo com recurso à lógica associativa e paramétrica, através do qual se procurou garantir a capacidade de gerar um conjunto de famílias de formas curvas.

Os protótipos revelaram-se fundamentais para a evolução, quer da metodologia quer do sistema construtivo, tendo sido possível constatar e colmatar as lacunas que estes apresentavam durante o seu desenvolvimento, concretamente aquelas resultantes da passagem de escala, assemblagem e funcionamento estrutural.

A pesquisa desenvolvida só foi possível com a abordagem teórico-prática desenhada aquando do esquema de investigação. Para tal foi adotada o método de Pesquisa-Ação que permite abordagens sucessivas ao problema, cruzando etapas, designadamente, descrição e reflexão, com momentos em que são implantadas ilações e pesquisas anteriormente obtidas, como forma de assegurar o desenvolvimento posterior harmonioso do objeto em análise.

O método Pesquisa-Ação permitiu a evolução do sistema brick-warp, a partir das diferentes questões que a realização dos respetivos protótipos colocou, o que progressivamente tornou possível ajustar processos e melhorar o sistema.

A realização do protótipo revelou-se de grande utilidade, já que a sua execução permitiu sancionar o conhecimento adquirido ao longo da tese e testar as inovações propostas. A execução das diferentes tarefas permitiu a tomada de consciência do grau de facilidade de montagem do sistema e dos possíveis ajustes que o processo pode ainda sofrer no sentido de ser otimizado.

O protótipo permitiu ainda que fossem efetuados testes de carga para aferir da viabilidade física da forma e do seu funcionamento estrutural.

O confrontar das ideias com a realidade, tornaram a tese menos especulativa e mais sólida, comprovando soluções e apontando um caminho correto com mais rigor.

10.5 Contributos

Os contributos desta tese podem ser agrupados em constatações e contributos, subdividindo-se estes últimos em; genéricos, específicos e fundamentais.

10.5.1. Constatações

A investigação efetuada permitiu constatar:

- a) A aplicação das tecnologias digitais na prática de arquitetura é ainda muitas vezes desarticulada, não tirando proveito do potencial disponibilizado pelo “*continuo digital*”, como se constatou por alguns resultados possibilitados pela morfogénese digital, em que se desatende a aspetos como a gravidade, a disfuncionalidade forma/função.
- b) As ferramentas e meios digitais só por si não dão garantias de projetos conceptualmente sólidos, nem dão garantias de uma resolução cabal dos problemas expressos no programa. Estas devem ser devidamente contextualizadas por uma metodologia operativa, de modo a que se obtenham as melhores soluções e os melhores processos.

- c) A prática do projeto de arquitetura suportada pelos métodos e ferramentas digitais produz resultados distintos dos alcançados por uma prática cerceada nos processos tradicionais de projeto. O carácter generativo e associativo disponibilizado pelas ferramentas digitais, possibilita a obtenção de um maior espectro de soluções, facto que é também pouco explorado, e que possibilita uma maior adequação ao programa e ao lugar.
- d) A utilização articulada de métodos e ferramentas digitais com os processos de fabricação em série possibilita obter um processo de manipulação, fabricação e construção mais eficiente com, menos desperdícios de material, menor custo e menor tempo de construção, o que permite tornar as superfícies curvas e de dupla curvatura mais eficientes.
- e) A diminuição dos recursos financeiros do tempo de execução empregues na construção destas formas estruturais potencia a sua utilização na arquitetura contemporânea.
- f) Os métodos desenvolvidos ao longo deste trabalho decorrem de um processo mental que abarca em simultâneo, a ideia conceptual e a manifestação material e tectónica do objeto arquitetónico.
- g) *O potencial disponibilizado pelas ferramentas digitais produz alterações, nos atos de pensar, representar, produzir e construir, alterando a prática do projeto de arquitetura, tal implica a necessidade de um ajustamento metodológico à nova realidade cognitiva e operativa.*
- h) O cálculo e a ideação da forma estrutural, resulta de perspetivas diferenciadas a geração da forma não se produz através de fórmulas matemáticas, mas ante a partir de uma compreensão do funcionamento estrutural da matéria, a abordagem analítica apenas permiti dimensionar a secção transversal da forma.

10.5.2. Contributos genéricos

Na investigação realizada podemos apontar os seguintes contributos genéricos:

- a) Proposta de um ciclo integrado de trabalho, o que significa incluir no processo a conceção e representação digitalis, a produção em série, e a customização através de ferramentas digitais. O processo conceptual e produtivo é uma resposta ao atual contexto tecnológico, tirando partido da potencialidade dos diferentes processos.
- b) Proposta para uma abordagem integrada e abrangente na utilização dos métodos de ferramentas digitais na prática da arquitetura: aqui, a aplicação das tecnologias digitais à prática da Arquitetura exponencia as possibilidades de representação da arquitetura, bem como a manipulação de geometrias complexas, i.e, as superfícies curvas e de dupla curvatura, sendo que estes meios utilizados de modo integrado permitem ainda o fabrico deste universo formal, de um modo otimizado.
- c) Proposta para a utilização de materiais tradicionais; a referida utilização deste tipo de matéria prima, resulta de uma manipulação geotérmica da forma, para que esta apenas produza compressão no seu funcionamento estrutural, sendo assim possível adotar materiais menos processados, logo mais baratos. No caso da cerâmica, beneficia-se ainda um *cluster* de referência na indústria portuguesa, sublinhando-se ainda que estes materiais apresentam menores índices de energia e carbono incorporado.
- d) Proposta de um sistema construtivo capaz de dar resposta aos princípios conceptuais do design paramétrico. Menges e Hensel propõem uma abordagem suportada por ferramentas digitais e nos processos generativos de conceção digital, como modo de promover uma estreita relação entre a forma arquitetónica e o meio em que esta se encerre. A morfo-ecológica afasta-se dos conceitos já banalizados de ecologia e sustentabilidade; indo muito além disso, este novo modo de pensar e conceber funda-se nas ciências, na teoria dos sistemas e na filosofia, propondo uma estreita relação entre a forma arquitetónica e o meio em que ela se encerra. A adaptação da forma arquitetónica ao meio revela-se uma mais valia ao nível da adequação da peça arquitetónica, o que se traduz em maiores níveis de conforto e de

desempenho ambiental, relativamente aos impactos gerados pela peça arquitetónica. O sistema ora proposto, e que se apelidou de brick-warp não se restringe, à invenção de um módulo cerâmico ou uma ferragem, que através de um ato mecânico produzem uma assemblagem que produz superfícies curvas. Este sistema teve presente na sua conceção uma perceção mais abrangente, dando expressão material a um conjunto mais vasto de princípios, deste modo a assemblagem não se esgota em si mesmo mas expressa uma realidade mais vasta a que o sistema responde, sendo ela própria intérprete desta nova filosofia conceptual.

- e) Proposta de uma investigação multidisciplinar de carácter teórico-prático, que se expressa no desenho de uma metodologia operativa de projeto para superfícies curvas e num sistema construtivo destinado à materialização de superfícies curvas. Os resultados apresentados apresentam impactos na comunidade científica expressa através de artigos científicos produzidos ao longo da tese, como na Indústria, o alcance do trabalho realizado estende-se ainda à prática e mesmo ao ensino da arquitetura.
- f) Produção de um protótipo de validação, o protótipo permite comprovar a capacidade de materialização de superfícies curvas por parte do sistema proposto, o seu funcionamento e adequação, puderam ser testados e agora ser aplicados para outras realizações.

10.5.3. Contributos específicos

Os contributos específicos relacionam-se com os contributos tectónicos do sistema, que podem beneficiar, não só a indústria, mas também a comunidade científica pelos seus princípios metodológicos, sendo de destacar:

- a) Proposta de um paradigma operativo para a pratica de projeto que associa o conceito de “continuo digital” enunciado por Kolarevic com o modelo teórico defendido por Mahfuz no *Ensaio da Razão Compositiva*. Estes conceitos apesar de serem oriundos de áreas disciplinares distintas, da sua abordagem à prática de projeto apresentam uma mesma matriz, sendo possível estabelecer um paralelo entre o “*continuo digital*”, e a visão transversal que não restringe a prática da arquitetura a um processo compositivo, conforme

expressado no Ensaio da Razão Compositiva (vide, supra, 10.1.2). No âmbito do processo mental holístico, que se pauta por uma visão integrada e transversal do ato de projetar, foi assim possível desenhar um quadro operativo, cuja base teórica encontra uma forma de expressão e um suporte operacional no “continuo digital”, gerando uma metodologia de projeto que permite potenciar e articular as soluções conceptuais em conjugação com os processos tectónicos.

- b) Proposta de desenho de um ciclo produtivo para a fabricação dos elementos constituem as superfícies curvas, em que a criação de um processo de produção híbrido que articula os processos de fabricação em série, com os processos digitais de personalização em série, gera um ciclo de produção que maximiza em simultâneo a produção e a personalização, aspetos que não encontram respaldo nos processos e ciclos de produção mais comuns.
- c) Proposta de um sistema construtivo para a formalização de superfícies curvas, em que a utilização de peças cerâmicas standardizadas passíveis de ser customizadas, permite a geração de superfícies curvas sem o recurso a cofragens, através da sua articulação com cabos que estabilizam a superfície durante o ciclo construtivo, deste modo dispensando a utilização de cimbramento, andaimes ou cavaletes de suporte. O sistema brick-warp consegue materializar superfícies curvas de um modo mais económico e eficaz.
- d) Proposta de utilização do pré-esforço para estabilizar as formas durante o processo de construção, eliminando-se assim a necessidade de sistemas de suporte durante o processo de construção. Este constituinte do sistema apresenta uma validade e uma aplicabilidade que extrapola o próprio sistema, sendo possível a sua disseminação a outras realidades construtivas. É expectável que os processos de fabricação dos módulos que constituem o sistema construtivo, possam sofrer uma atualização tecnológica, ou mesmo ser realizados através de outros, ou mesmo com outro material, contudo enquanto existir gravidade a função dos cabos manter-se-á.

10.5.4. Contributos fundamentais

Os contributos fundamentais relacionam-se com os aspetos teóricos e tectónicos, que podem viabilizar a implementação do sistema desenvolvido e sem os quais este não seria viável, sendo de destacar:

- a) Paradigma operativo para a conceção e construção de superfícies curvas e de dupla curvatura, baseado nos meios tecnológicos digitais, os quais permitem uma abordagem holística à prática da arquitetura, integrando as referidas conceção e construção num ciclo articulado que consubstancia um processo mais eficiente, capaz de levar a cabo as tarefas de manipulação geométrica e fabricação dos componentes que materializam a superfícies curvas.
- b) A investigação realizada no âmbito da metodologia de projeto, gerou uma taxonomia própria, que responde com eficiência ao novo paradigma autográfico, que as ferramentas digitais configuram, em que estas não só vieram abrir novas possibilidades à arquitetura, como geram novos desafios e obrigam à adoção de novas práticas, como por exemplo, a visão integrada e transversal de cada objeto idealizado,, em termos e.g., de ação gravítica, construção ou inclusive custos.
- c) Sistema construtivo modelar personalizável, capaz de dar resposta às exigências colocadas pela construção de formas estruturais curvas. O sistema resulta da personalização de módulos cerâmicos produzidos em série.
- d) Peças cerâmicas desenhadas com o intuito de acolher um cabo de pré-esforço, em que a sua forma foi pensada para que possa ser produzida em série e a sua personalização implique o mínimo de recursos, tempo de execução e desperdícios.
- e) Sistema de cabos de garantem a estabilização da superfície curva durante o processo de construção. As ferragens de clipagem geram compressão nos modelos cerâmicos de modo a fixa-las, estas foram concebidas para dar resposta específica ao sistema.

- f) O protótipo construído permitiu testar não só a solução construtiva proposta, denominada brick-warp, como também o paradigma operativo desenvolvido. As etapas que culminaram na construção do protótipo proporcionou uma melhor compreensão das potencialidades colocadas ao alcance do arquiteto quando utiliza as ferramentas digitais de um modo integrado, articulando a conceção e construção.

10.6 Trabalhos futuros

A investigação realizada produziu resultados a nível teórico e tecnológico. A nível tecnológico, a investigação desenvolveu um sistema construtivo que operacionaliza a construção de superfícies curvas, sendo que o trabalho a desenvolver no futuro pode passar num primeiro momento pela melhoria do próprio sistema através de uma otimização dos componentes e da sua articulação.

O desenvolvimento de novos módulos pode igualmente passar pela exploração de outros materiais, em cuja escolha deve estar presente a realidade produtiva nacional, de modo a não só beneficiar do conhecimento instalado, como também dinamizar esses *clusters* através da investigação produzida.

Por outro lado, e numa interpenetração com a doutrina mais tradicional, que não foi explorada na presente tese, por estar manifestamente fora do seu escopo, podem ainda analisar-se outras possibilidades, com forte interesse operativo, designadamente a utilização deste sistema como cofragem de outras aplicações, sendo nesse caso pertinente a adoção de outro material base.

No âmbito da teoria resulta claro que o novo paradigma autográfico gerado pela aplicação das tecnologias digitais, não só vem abrir novas possibilidades à arquitetura, como gera novos desafios e obriga à adoção de novas práticas. Em função da primeira geração de ferramentas CAD, o professor Bernard Tschumi realizou um conjunto de workshops na Universidade de Columbia que designou de paper less studios, sendo uma resposta didática à realidade produzida pelas ferramentas digitais.

O novo quadro operativo (CAD/CAE/CAM) e as reflexões aqui produzidas poderão contribuir para estabelecer uma base de reflexão capaz de produzir uma abordagem didática inovadora, encetando uma reflexão, quer no plano científico dos conteúdos

programáticos, quer nos métodos pedagógicos a utilizar. Este é um desafio a abraçar pela comunidade docente/académica.

10.7 Conclusão final

A tese propôs com sucesso uma metodologia operativa que recorre à aplicação das tecnologias digitais na arquitetura, como base funcional para o desenho e construção de superfícies curvas e de dupla curvatura. Estes meios ao serem utilizados de modo integrado permitem colmatar as dificuldades de manipulação e construção intrínsecos a este universo formal.

A investigação produzida a nível tectónico propôs um sistema construtivo que resulta da aplicação de compressão nas diferentes peças que constituem a superfície, deste modo, estabilizando a forma durante o processo de construção. O processo de fixação de peças cerâmicas, vem colmatar um dos principais óbices inerentes à construção de superfícies curvas, tornando assim possível eliminar-se a utilização de cofragens e cimbramentos.

A solução construtiva integra um módulo standard personalizável, já a conceção e fabricação gerou um processo de produção em série personalizável, assegurando deste modo níveis elevados de produtividade com um elevado grau de personalização.

Todos estes fatores permitem diminuir os custos associados à produção destas formas e aumentar a rapidez de execução, potencializando a respetiva utilização na arquitetura, contribuindo-se assim para o aumento da diversidade espacial.

A articulação dos diferentes processos de produção que mistura soluções high-tech com soluções low-tech, permite ganhar eficiência e diminuir custos, bem como facilitar a disseminação deste processo, não o tornando refém de centros de alta tecnologia. A sua aplicabilidade a diferentes contextos tecnológicos é uma das virtudes do processo, uma vez que, mesmo os meios tecnológicos mais avançados presentes neste ciclo integrado de conceção construção são bastante acessíveis.

A construção do protótipo serve como *Proof concept* no qual se plasmou o conhecimento e as soluções encontradas para implementar a presença das formas curvas e de dupla curvatura no panorama da arquitetura contemporânea.

A investigação produzida realça a importância da conceção digital e das alterações que esta introduz na prática e na aprendizagem do Projeto de arquitetura, estas mudanças acarretam alterações no processo ideativo e cognitivo.

Bibliografia

Livros

A

Allen, S. (2008) *Practice: Architecture, Technique and Representation*. New York: Routledge.

B

Billington, D.P. (1983) *The Tower and the Bridge*. New York: Basic Books.

Billington, D.P. (1989) *Robert Maillart*. Cambridge: MIT Press.

Blackshaw, M. et al. (2011) *Feather Morphologies Crafted By Nature*. Cambridge: MIT Media Lab.

Bourabaki, N. (1998) *Elements of the History of Mathematics*. Berlin: Springer-Varlag.

Burrell, G and G. Morgan (1979) "Sociological paradigms and organizational analysis." Tradução livre do prof. Wellington Martins, EA/UFBa. London: Heinemann.

Burry, M., (2013) *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*. London: John Wiley & Sons.

C

Caldas, M. P. (2005). "Paradigmas em Estudos Organizacionais: Uma Introdução à Série. RAE" - Revista de Administração de Empresas.

Carpo, M. (2011) *The Alphabet and the Algorithm*. Cambridge: MIT Press.

Chandler, A. and R. Pedreschi (2007) *Fabric Formwork*. London: RIBA Publishing.

Chein, A., Cook, S. W., Harding, J. (1948) *The field of action research. American Psychologist*. Washington.

Cipolla, C. M. (1974) *História Económica da Europa Pré-Industrial*. São Paulo: Edições 70.

Corbusier, Le J. and P. Jeanneret (1926) *Five Points Towards a New Architecture*. Paris.

Corbusier, Le (2006) *Por Uma Arquitetura*. São Paulo: Perspectiva.

Corey, S. M. (1958) *Action research, fundamental research and educational practice*. Teachers College Record, Nova York, n. 50, p. 509-514.

Creswell, J. (2003) *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Method Approaches*. Thousand Oaks, Sage Publications, 2nd ed.

D

- Davies, M. (2004) *O Computador Universal*. Lisboa, Editora Bizâncio.
- Davis, S. (1987) *Future Perfect*. Massachusetts: Addison Wesley.
- Delumeau, Jean (1984) *A Civilização do Renascimento* (Vol.1). Lisboa: Editorial Estampa.
- DeVincenzi, A. and N. W. Polanski (2011) *Seed Morphologies, Crafted By Nature*. Cambridge: MIT Media Lab.
- Dieste E. 1996, Technology and underdevelopment, in *Eladio Dieste, 1943-1996*, Jiménez Torrecillas A (ed|) Seville, Consejería de Obras Públicas y Transportes Solano benitez.
- Dormer, Peter (1994) *The Art of the Maker – Skill and Its Meaning in Art, Craft and Design*. London: Thames and Hudson.
- Duarte, J. P. (1995) *Tipo e módulo – Abordagem ao Processo de Produção de Habitação*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

E

- Eastman, C (1999) *Building product models: computer environments supporting design and construction* CRC Press: Boca Raton, FL.
- Eliam, E. and Chikofsky, E. J. (2007) *Reversing: Secrets of Reversing Engineering*. John Wiley & Sons.
- Elliot, J. (1991) *Action research for educational change*. Filadélfia: Open University Press.
- Emmer, M (2004) *Mathland, from flatland to hypersurfaces* Birkhäuser user. Basel.
- Engel, H. (1981) *Sistemas Estruturais*. Brasil: Editora Limitada.
- Engel, H. (1997) *Sistemas Estruturais*. Barcelona: Gustavo Gili.

F

- Faber, Colin(1963) *The Shell Builder*. Reinhold Publishing Corporation.
- Fals-Borda, O.; Rahman, M. A. (1991.). *Action and knowledge: breaking the monopoly with participatory action research*. Londres: Intermediate Technology.
- Farin, G. (2002) *Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Fiori, R. (2005) *Arquitetura, espaço e lugar*. In: A. WICKERT (org.), *Arquitetura e Urbanismo em debate*. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo.
- Fonseca, C. (2007) *História da Computação – O Caminho do Pensamento e da Tecnologia*. EDIPUCRS.

Freire, P. (1972) *Creating knowledge: a monopoly*. Nova York: Penguin.

G

Gershenfeld, N. (2007) *FAB – The Coming Revolution on Your Desktop – from Personal Computers to Personal Fabrication*. New York: Basic Books.

Gibson, L. and M. Ashby (1999) *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: University Press.

Gibson, L. et al. (2010) *Celular Material in Nature and Medicine*. Cambridge: University Press.

Gilmore, J. and J. Pine (2000) *Markets of one: Creating Customer-Unique Value thought Mass Customization*. Boston: Harvard Business Review.

Gould, S J (2002) *The structure of evolutionary theory*: Harvard University Press.

Gramazio, F. and M. Kohler (2007) *Digital Materiality in Architecture*. Baden: Lars Müller Publishers.

Greenwald, Douglas (1973) *Hill Dictionary of Modern Economics - A Handbook of Terms and Organizations*. New York: The McGraw – Hill.

Grundy, S. J., Kemmis, S. (1982) *Educational action research in Australia: the state of the art*. Geelong: Deakin University Press.

H

Hart, E.; Bond, M. (1997) *Action research for health and social care: a guide to practice*. Buckingham: Open University Press, 1997.

Hebel, D.E. et al. (2015) *SUDU: Research and Manual*. Berlin: Ruby Press.

Hill, J. (2006) *Immaterial Architecture*. New York: Routledge.

Hirschheim, R. (1992) *Information Systems Epistemology: An Historical Perspective*, Information Systems Research: Issues, Methods and Practical Guidelines. R. Galliers. Oxford, Blackwell Scientific Publications.

Holgate, A. (1986) *The Art in Structural Design*. Oxford: Clarendon Press.

Holgate, A. (1992) *Aesthetics of Built Form*. Oxford: Oxford University Press.

Huerta, S. (ed.) (2001) *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

J

Jenkins, D. (ed.) (2004) *Norman Foster Works*. Munich: Prestel Verlag.

Joucka, R. and J. C. Francis (2012) *Hybios: Hybrid BIOStructures*. London: Architectural Association School of Architecture.

K

- Kalay, Y (2004) *Architecture's new media*. Cambridge: The MIT Press.
- Kieran, S. and J. Timberlake (2004) *Refabricating Architecture – How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction*. New York: Mc- Graw-Hill.
- Kolarevic, B. (2003) *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. New York: Taylor & Francis.
- Kolarevic B. and A. Malkawi (eds) (2004) *PERformative Architecture: Beyond Instrumentality*. New York: Routledge.
- Kolarevic, B. (2005) *Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age*. Oxon: Taylor & Francis Group.

L

- Lawson, B (1997) *How designers think (3rd edn)* . London: Architectural Press.
- Lee, K. (1999) *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*: Addison Wesley Longman.
- Lemos, Carlos (1980) *O que é arquitetura*. São Paulo: Brasiliense.
- Lewin, K. (1946) *Action research and minority problems*. Journal of Social Issues, n. 2.
- Lippitt, R.. Watson, J.. WESTLEY, B. (1958) *The dynamics of planned change*. Nova York: Harcourt Brace.
- Lynn, G (1999) *Animate form Princeton Architectural Press*, New York Migayrou F and Brayer M A (eds) (2001) *Archilab: radical experiments in global architecture*, Thames and Hudson, London.

M

- Macdonald, A. (2001) *Structure and Architecture*. Elsevier.
- Maifuz, E. (1995) *Ensaio da Razão Compositiva*. Belo Horizonte: Ap Cultural.
- Marchant, J. (2008) *Decoding the Heavens: Solving the Mystery of the World's First Computer*. Londres: Windmill Books Ltd.
- Mark, R. (1982) *Experiments in Gothic Structure*. MIT Press.
- Menges, A. and S. Ahlquist (eds) (2011) *Computation Design Thinking*. London: John Wiley & Sons.
- Mitchell, W.J. (2001) *"Roll Over Euclid: How Frank Ghery Designs and Builds"*, in J. Fiona Ragheb (ed.), *Frank Ghery, Architect*, pp. 352-363, New York: Guggenheim Museum Publications.
- Morais, A. (1997) *A Morfologia Das Estruturas na Concepção Arquitectónica*. Ecosoluções Lda.

Morais, A. (2016) *As Dimensões Esquecidas da Architectuura, o potencial estético da forma estrutural*. Edição digital.

Morgan, G. (2005) *Paradigmas, Metáforas e Resolução de Quebra-Cabeças na Teoriadas Organizações*. RAE - Revista de Administração de Empresas.

N

Nerdinger, W. (ed.) (2005) *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*. Birkhäuser.

O

Otto, F. and B. Rasch (1996) *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. Stuttgart: Edition Axel Menges GmbH.

P

Peters B. and T. Peters (2013) *Inside Smartgeometry, Expanding the Architectual Possibillities of Computing Design*. London: John Wiley & Sons.

Pine, B. J. (1993) *Mass Customization – The New Frontier in Business Competition*. Boston: Harvard Business School Press.

Popper, K. (1999) *“Conjeturas e refutações”* Almedina, Lisboa.

Pye, D. (1995) *The Nature and Art of Workmanship*. Londres: The Herbert Press.

R

Reas, Casey, MacWilliams, Chandler (2010) *Form+Code in Design, Art, and Architecture*: Princeton Architectural Press.

Rebello, Y. (2000) *A Concepção Estrutural e a Arquitetura*. São Paulo: Zigurate Editora.

Revons, R. W. (1971) *Action learning: new techniques for managers*. Londres: Blond & Briggs.

Rogers, R. (1991) *Architecture, A Modern View*. London: Thames and Hudson.

Rutten, D. (2007) *RhinoScript™ 101 for Rhinoceros 4.0*. Robert McNeel Associates.

S

Salmon, G. (1879) *Higher Plane Curves Hodges, Foster, and Figgis*. Dublin.

Salvadori, Mario (1994) *Estructura para arquitectos*. Buenos Aires: Editorial CP 67.

Samyn, P. (1997) *Architecture to be lived*. L' Arca Edizione.

Schön, D. (1983) *The reflective practitioner: how professionals think in action*. Nova York: Basic Books.

Schodek, Daniel. Bechthold, Martin. Griggs, Kimo. Kao, Kenneth Martin & Steinberg, Marco (2005): *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken.

Songel, J.M. (2008) *Frei Otto. Conversación com Juan Maria Songel*. Barcelona: Gustavo Gili.

Stewart, Frances (1977) *Technology and Underdevelopment*. UK: Palgrave Macmillan.

I

Terzidis, K. (2006) *Algorithmic Architecture*. Routledge.

Tripp, David (2005) *Pesquisa-ação: uma introdução metodológica*. Educação e Pesquisa. São Paulo.

V

Vincent, Julian (2009) *Biomimetic Patterns in Architectural Design*, D Patterns of Architecture, vol 79, No 6. pp 74-81.

Vitrúvio (2006) *Tratado de Arquitectura* (tradução do latim, introdução e notas por M. Justino Maciel). Lisboa: IST Press.

Vogel, S. (2003) *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton: University Press.

Volpato, N. et al. (2007). *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher.

W

Woudhuysen, J. and I. Abley (2004) *Why is Construction so Backward?* Chichester: Wiley-Academy.

E-Book

M

Mcniff, J. (2002) Action research for professional development: concise advice for new action researchers. Accessed 2017 <<http://www.jeanmcniff.com/booklet1.html>>

Morais, António José (2016) *As Dimensões Esquecidas da Arquitetura, O potencial estético da forma estrutural*.

S

Silva, D. M. and A. K. Souto (2015) *Estruturas: uma abordagem Arquitectónica*. Porto Alegre: Editora Uni Ritter. Issuu. Accessed 2017 <<https://issuu.com/editorauniritter/docs/estruturas>>.

Capítulos em Livros

- Block, P. et al. (2014) "Ribbed tile vaulting: innovation through two design-build workshops", in Gramazio, F. et al. (eds) *Fabricate: Negotiating Design & Making*, pp. 22 – 29. Zurich: gta Verlag.
- Cervera Sarda, M. R. (2011) "Las Formas en la Naturaleza", in Pioz J. G., *Arquitectura y Biónica, Arquitectura + Ingeniería + Biología*, pp. 13-22. Cuenca: Diputación provincial de Cuenca.
- Coop Himmelblau (Wolf D. Prix) (1991) "Strong Form, Weak Form", in Noever, P. and R. Haslinger (eds) *Architecture in Transition: Between Deconstruction and New Modernis*, pp. Munique: Prestel-Verlag.
- Davis, L. and P. Block (2012) "Earthen Masonry Vaulting: Technologies and Transfer", in Cherenet, Z. and H. Sewnet (eds.), *Building Ethiopia: Sustainability and Innovation in Architecture and Design* pp. 219-232. Addis Ababa: Shama Books.
- Ramage, M.H. et al. (2015). "Light Earth Designs: Natural material, natural structure", in Mileto, C. et al. (eds.), *Earthen Architecture: Past, Present and Future* pp. 305-310. London: Taylor & Francis Group.
- Schon, D A and Wiggings, G (1988) Kinds of seeing and their functions in designing Design Studies Vol 13 No 2 pp 135-156.

Artigos de Conferências

- Akbarzadeh, M. et al. (2015) "3D Graphic Statics: Geometric Construction of Global Equilibrium", *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures(IASS)Symposium Amsterdam*. BRG. Accessed 2017.
<<http://block.arch.ethz.ch/brg/content/publication/464> >
- Block, P. and J. Ochsendorf (2008) "Lower-bound Analysis of Masonry Vaulted Structures", paper presented at the SAHC'08 6th International Conference, Bath, Uk (2-4 July)
- Bonwets ch, T. et al. (2006) "The Informed Wall - Applying Additive Digital Fabrication Techniques on Architecture", paper presented at the Synthetic Landscapes [Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture], ACADIA, University of Kentucky, Lexington, Louisville, Kentucky, USA.
- Burry, M and Murray, Z (1997) Computer aided architectural design using parametric variation and associative geometry Challenges of the future, ECAADE Conference

- Proceedings, Vienna Cross, N (ed) (1984) Developments in design methodology, John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Coenders, J.L. (2009) "Parametric and Associative Design as a Strategy for Conceptual Design and Delivery to BIM", paper presented at the *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009*, Valencia, Spain.
- DeJong, M.J., Ramage, M.H., Travers, B., Terry, S. (2011, September). Testing and analysis of geogrid-reinforced thinshell masonry. In *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium*. London.
- Duarte, José Pinto. CELANI, Gabriela. PUPO, Regiane; "Inserting computational technologies in architectural curricula", em Gu, Ning and Wang, Xiangyu (ed.), computational design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education, Hershey, PA:IGI Global, 2011.
- IASS (2010), Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures, papers presented at the Symposium 2010, Shanghai Spatial Structures – Permanent and Temporary, Shanghai, China (8-12 November).
- Klinger, K. (2007) "Information Exchange in Digitally Driven Architecture", papers presented at the Sigradi 2007: Sociedade Ibero-Americana de Gráfica Digital, Cidade do México, México.
- Kolarevic, B. (2000). "Digital Architectures", paper presented at the Proceedings of the ACADIA 2000 Conference, Washington, DC, USA.
- Krieg, O. et al. (2011) "Performative Architectural Morphology: Robotically manufactured biomimetic finger-joined plate structures", papers presented at the Proceedings of the eCAADe Conference 2011, University of Ljubljana, Slovenia (21-24 September).
- Ochsendorf, J. (2012) "New Tile Vaults. In Zaragoza", papers presented at the Construyendo bóvedas tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre bóvedas tabicadas. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Oxman, N. (2009) "Material-based Design Computation: Tiling Behavior", papers presented at the ACADIA 09: reForm Building a Better Tomorrow, Proceedings of the 29 th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design Architecture, Chicago, Illinois, USA (22-25 October).
- Peters, B., (2007) "The Smithsonian Courtyard Enclosure: Computer Programming as a Design Tool", paper presented at the Expanding Bodies: Art, Cities, Environment, Proceedings of the ACADIA 2007 Conference, Riverside Press, Waterloo, Ontario, Canada.

- Sousa, J. P. and J. P. Duarte (2005) "Digital Desires, Material Realities - Perceiving the Technological Gap", paper presented at the Digital Design: The Quest for New Paradigms 23rd eCAADe Conference Proceedings, Lisboa, Portugal.
- Turing, Alan (1937) "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42(2): 230-65. CS Virginia. Accessed 27 December 2011 <www.cs.virginia.edu/~robins/Turing_Paper_1936.pdf>.

Artigos Impressos

- Bartunek, J and M. Seo (2002) "*Qualitative research can add new meanings to quantitative research.*" *Journal of Organizational Behavior* 23: 21-48.
- Block, P. et al. (2010) "Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa", *ATDF Journal (African Technology Development Forum)* 7(1/2): 4-13.
- Block, P. and J. Ochsendorf (2007) "Thrust Network Analysis: A new Methodology for Three-Dimensional Equilibrium", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 48: 167-73.
- Block, P. et al. (2006) "Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings". *Computers and structures*, 84: 1841-1852.
- Buswell, R.A. et al. (2007) "Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for Construction", *Automation in Construction* 16(2):224-231.
- Davis, L. et al. (2012) "Innovative Funicular Tile Vaulting; A prototype in Switzerland", *The Structural Engineer* 90(11): 46-56.
- Denscombe, M. (1998) "*The Good Research Guide for Small-scale Social Research Projects. Buckingham: Open*" University Press.
- Easterby-Smith, M. et al. (1991) "*Management Research: An introduction.*" London Sage.
- Gephart Jr., and P. Robert (2004) "*Qualitative Research and the Academy of Management*" *Journal*. From the Editors. *Academy of Management Journal* 47: 454-462.
- Gibson, L. (1985) "*The Mechanical Behaviour of Cancellous Bone*", *Journal of Biomechanics* 18(5): 317-28.
- Gunther, H. (2006) "*Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão?*" *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, 22: BARTUNEK 201-210.
- Hensel M, Weinstock M and Menges A (eds) (2004) *Emergence: morphogenetic design strategies*, Architectural Design (AD) Vol 74 No 3, Wiley-Academy.

- Hensel, Michael (2008) AD 192-Architectural design march/april 2008 Versatility and Vicissitude Performance in Morpho-Ecological Design ISBN -978 0470516874 profile nº 192 vol 78 nº2 , England, Wiley-Academy.
- Leal, José Sánchez (2000) *Leal Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000*, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, 2000. Bóvedas extremeñas y alentejanas de rosca y sin cimbra.
- Locke, K. (1993) 'Re-writing the discovery of grounded theory after 25 years?' Journal of Management Inquiry.
- López López, D. et al. (2014) "Brick-topia", the thin-tile vaulted pavilion, *Case Studies in Structural Engineering* 2: 33-40.
- Menges, A. (2006) "'Manufacturing Diversity'. D Techniques and Technologies", *Morphogenetic Design* 76(2): 70-7.
- Morais, António J. (2008) *A fronteira da responsabilidade entre arquiteto e engenheiro no estabelecimento e definição da conceção do sistema estrutural de um edifício*. Revista Artitextos 08, FAUL.
- Oxman, N. (2010) "Structuring Materiality: Variable property Fabrication of Heterogeneous Materials". *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies* 80(4): 78-85.
- Peters, B. (2013) "Computation Works the Building of Algorithmic Thought", *AD Architectural Design* 83(2): 1-152.
- Piker, D. (2013) "Kangaroo: Form Finding with Computational Physics", *AD Architectural Design* 83(2): 136-137.
- Ramage, M.H. (2007) "Guastavino's Vault Construction Revisited", *Construction History*, 22: 47-60.
- Ramage, M.H. et al. (2010) "Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa.", *ATSF Journal* 7(1/2): 14-23.
- Ramage, M.H. et al. (2010) "Sustainable Shells: New African vaults built with soil-cement tiles", *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures*, 51(4): 255-261.
- Sass, L. and R. Oxman (2006) "Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design", *Design Studies* 27.
- West, M. (2008) "Thinking With Matter", *AD Architectural Design: Protoarchitecture – analogue and digital hybrids* 78(4): 25-55.

Artigos Online

- Ahlquist, S. and A. Menges (2012) "Physical Drivers: Synthesis of Evolutionary Developments and Force-Driven Design", *Architectural Design* 82(2): 60-67. Wiley Online Library. Accessed 2017.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.1380/abstract>.
- Bennett, L. (2012) "Philippe Block: Bricks Don't Lie", *Archi-ninja*. Accessed 24 March 2017 <<http://www.archi-ninja.com/philippe-block-bricks-dont-lie/>>.
- Block, P. (2007) "Thrust Network Analysis: a New Method for Understanding Three-dimensional Funicular System". MIT. Accessed 2017 <<http://web.mit.edu/masonry/thrustNetwork/#ABSTRACT2> >
- "Block Research Group at the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETH Zurich)". (n.d.) Accessed 7 December 2015) <http://block.arch.ethz.ch>.
- Burger, N. et al. (2006). "Felix candela, elegance and endurance: an examination of the xochimilco shell" *Journal of the international association for shell and spatial structures:iass*. Accessed 2018 <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.545.4812&rep=rep1&type=pdf>>
- ICD (2011) "ICD/ITKE Research Pavilion 2011". ICD.UNI-Stuttgart. Accessed 2017 <<http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>>
- Jacobo, G. (2004) "El Diseño Estructural por Medio de los Métodos Gráficos – Resumen", UNNE.EDU.AR. Accessed 2017
 <<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-088.pdf> >
- Kilian, A. (n.d.) "Linking Hanging Chain Models to Fabrication". MIT. Accessed 2017 <<http://designexplorer.net/newscreens/cadenarytool/KilianACADIA.pdf> >
- Kolarevic, B. (2005) *Designing and Manufacturing Architecture in The Digital Age*. Oxon: Taylor & Francis Group.
- Kotnik, T. and M. Weinstock (2012) "Material, Form and Force", *AD Architectural Design Magazine: Protoarchitecture – analogue and digital hybrids. England* 82(2): 104-111. Wiley Online Library. Accessed 2017 <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.1386/abstract>>
- Mahfuz, E. (2006) *Reflexões sobre a construção da forma pertinente*. Accessed 23 January 2017 <<http://www.vitruvius.com.br>>
- Mathworks (n.d.) "MATLAB Compiler". Accessed 2017 <<http://www.mathworks.com/products/compiler/>>
- McNeel R. (2016) "Rhino.NET Plug-in SDK (Software Development Kit)", *WikiMcneel*. Accessed 2017 <<http://wiki.mcneel.com/developer/dotnetplugins>>

- McNeel R. (2016) "Grasshopper (Generative Modeling for Rhino)." Accessed 2017 <<http://www.grasshopper3d.com/>>
- Oxman, Rivka (2005) *Theory and design in the first digital age*, Faculty of Architecture and Town Planning Technion.Haifa. Accessed 15 January 2018 <http://arq510002.paginas.ufsc.br/files/2011/04/Design-Studies-Theory-and-design-in-the-first-digital-age-Rivka-Oxman-1.html>
- Palacio, Julian (2014) Material tour de force: the work of Eladio Diest. Accessed 2017 <https://archleague.org/article/material-tour-de-force-the-work-of-eladio-dieste/>
- Pedreschi. R. (2010) "Theodossopoulos D.- Eladio Dieste; 'resistance through form' - Structures and Architecture" Accessed 2018 <https://www.researchgate.net/publication/282976523_Eladio_Dieste_Resistance_through_form>
- Pupo Regiane, Celani Gabriela (2009) *Técnicas de Prototipagem Digital para Arquitetura*, VIII Internacional Conference on Graphics Engineering for Arts and Ddesign. Accessed 23 January 201 <http://www.fec.unicamp.br/~lapac/papers/pupo-celani2009.html>
- Rocha, Daniel (2006) *Adoção Do Partido Na Arquitetura* ,Accessed 23 January 2017 <<https://pt.scribd.com/document/177033668/A-ADOCACAO-DO-PARTIDO-NA-ARQUITETURA>>
- ThinkParametric (n.d.) "MSc2 studio at Hyperbody at TU Delft". Accessed 2007 <<http://designplaygrounds.com/deviants/msc2-studio-at-hyperbody-at-tu-delft/>>
- Weisstein, E. (n.d.) "Topology", *MATHWorld—A Wolfram Web Resource*. Wolfram Mathworld. Accessed 15 January 2012 <<http://mathworld.wolfram.com/Topology.html>>
- West, Mark (n.d.) Fabric Form Cast Accessed 23 January 2017 <https://fabricform.wordpress.com/about/mark-west/>
- Winterstetter, 2011 Heydar Aliyev Center / Zaha Hadid Architects Accessed 01 January 2010 <http://buildipedia.com/aec-pros/from-the-job-site/zaha-hadids-heydar-aliyev-cultural-centre-turning-a-vision-into-reality>

Dissertações

- Block, P. (2005). "Equilibrium Systems: Studies in Masonry Structure". M.Sc. in Architecture Studies Thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology.
- Block, P. (2009). *Thrust Network Analysis: Exploring Three-dimensional Equilibrium*. PhD dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

- Henriques, G. (2013) "Tetrascript: Sistemas Responsivo para Controlar a Luz, de Acordo com Factores Externos e Internos". Tese de Doutoramento, FAUTL, Lisboa. Repository UTL. Accessed 2007
<https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/.../3/_2013TeseGoncaloHenriques.pdf>
- Lau, W. (2006). *Equilibrium Analysis of Masonry Domes*. M.Sc. in Building Technology Thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology.
- Marquardt, S. (2005). *A estrutura independente e a arquitectura moderna brasileira*. Tese mestrado apresentada na Universidade do Rio Grande do Sul.
- Marquardt Seina (n.d) *A estrutura independente e a arquitectura moderna brasileira*. Tese mestrado apresentada na Universidade do Rio Grande do Sul.
- Saura, C. (2003). "Aplicação da Prototipagem Rápida na melhoria do Processo de Desenvolvimento de Produtos em Pequenas e Médias Empresas". Dissertação Mestrado, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Sousa, J. P. (2010) "From Digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the Use of CAD/CAM Technologies". PhD Thesis in Architecture, ISTUTL, Lisboa.

Relatórios

- Engelbart, D. C. (1962) "Augmenting Human Intellect: A Conceptual Framework" (SRI Summary Report AFOSR-3223). Prepared for: Director of Information Sciences, Air Force Office of Scientific Research, Washington DC. Accessed 2017
<<https://www.dougenelbart.org/pubs/augment-3906.html>>
- McKinsey & Company e MGI (coordenação do Ministério da Economia) (2003), "Portugal 2010: Acelerar o Crescimento da Competitividade". Lisboa: Ministério da Economia de Portugal.
- Wohlers, T. (2008) "Wohlers Report 2008". Colorado: Wohlers Associates.